

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ



Studijní program: B3107 Textil
Studijní obor: 3107R007 Produktový management

**VÝVOJ FILTRAČNÍHO MATERIÁLU
OBSAHUJÍCÍHO BIODEGRADABILNÍ NANO-
VLÁKENNOU MEMBRÁNU PRO
VZDUCHOVOU FILTRACI**

**DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE
NANOFIBER-BASED FILTER MEDIUM FOR
AIR FILTRATION**

Jana Kettnerová

KHT-189

Vedoucí diplomové práce: Ing. Daniela Lubasová, Ph.D.

Rozsah práce:

Počet stran textu ...60

Počet obrázků40

Počet tabulek9

Počet grafů.....11

Počet stran příloh..27

Zadání diplomové práce

(vložit originál)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená *diplomová (bakalářská)* práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *diplomové (bakalářské)* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou (*bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové (*bakalářské*) práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové (*bakalářské*) práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové (*bakalářské*) práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci dne 20.5.2013

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla velmi poděkovat paní Ing. Daniele Lubasové, Ph.D. za odborné vedení a pomoc se zpracováním diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat své mamince Monice Kettnerové a Janu Vajdovi za podporu v celém průběhu studia.

ANOTACE

Diplomová práce je zaměřena na vývoj biodegradabilního filtru obsahujícího biodegradabilní nano-vláknennou membránu, určeného pro vzduchovou filtraci. V rešeršní části je popsána vzduchová filtrace, výroba nano-vláknenných membrán pomocí elektrostatického zvlákňování a použití nano-vláken ve vzduchové filtraci. Dále jsou zmíněny výhody použití biodegradabilního polymeru v závislosti na životním prostředí a testy biodegradability takovýchto materiálů.

Úkolem experimentální části bylo připravit filtry s různou plošnou hmotností nano-vláknenné membrány ze směsi chitosan/polyethylenoxid, zvlákněnou na dva různé typy substrátů. Zkoumány byly vlivy plošných hmotností na filtrační efektivitu a na tlakový spád filtru. Na závěr byl proveden test biodegradability vyvinutého filtru.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Filtrace, elektrostatické zvlákňování, biodegradabilita, nano-vláknna

ANNOTATION

The thesis is focused on the development of biodegradable filter containing biodegradable nano-fiber membrane, designed for air filtration. The search section describes air filtration, production of nano-fiber membranes by electrospinning and using nano-fibers in air filtration. Further are mentioned advantages of using biodegradable polymer, depending on the environment, and tests of biodegradability of such materials.

The task of the experimental part was to prepare a filter with different basis weight of nano-fiber membrane from a polymer mixture of chitosan / polyethylene oxide, spun on two different types of substrates. The effect of basis weight of nano-fiber membrane on the filter efficiency and pressure drop across the filter was examined. Finally, biodegradability of the developed filter was tested.

KEY WORDS:

Filtration, electro spinning, biodegradability, nano-fibers

Obsah

ÚVOD	- 10 -
1. TEORETICKÁ ČÁST	- 12 -
1.1. Filtrace	- 12 -
1.1.1. Rozdělení filtrace.....	- 12 -
1.2. Parametry filtrace	- 17 -
1.3. Metody testování filtračních vlastností	- 19 -
1.4. Typy filtrů.....	- 21 -
1.5. Nejčastěji používané materiály k výrobě vzduchových filtrů	- 21 -
1.6. Biodegradabilní polymer	- 22 -
1.7. Test biodegradability polymeru.....	- 23 -
1.8. Nano-vlákna.....	- 24 -
1.9. Elektrostatické zvlákňování	- 24 -
1.10. Rizika nano-částic	- 27 -
1.11. Poslední výzkum a vývoj použití nano-vlákenných vrstev ve vzduchové filtraci.....	- 28 -
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 34 -
2.1. Použité chemikálie.....	- 34 -
2.2. Použitá zařízení pro výrobu testovaných filtrů	- 37 -
2.3. Použité testovací metody.....	- 40 -
2.4. Zvlákňování podkladového materiálu PET/LA pomocí metody melt-blown	- 43 -
2.5. Příprava nano-vlákenné membrány CH/PEO pomocí elektrostatického zvlákňování	- 44 -
2.6. Testování filtračních vlastností zhotovených nano-filtrů pomocí zařízení MFP 1000 HEPA	- 45 -
2.7. Shrnutí výsledků testů filtrace	- 53 -

2.8. Testování biodegradabilních vlastností zhotovených nano-filtrů.....	- 59 -
2.9. Shrnutí výsledků testů biodegradace	- 62 -
2.10. Shrnutí dosažených výsledků	- 65 -
 Závěr	 - 68 -
Použitá literatura	- 69 -
Seznam příloh	- 72 -

Seznam zkratk a symbolů

AHAM	Association of Home Appliance Manufacturers, obchodní sdružení průmyslu domácích spotřebičů
ANSI	American National Standards Institute, nezisková organizace
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, společnost zaměřená na stavební technologie
ASME	American Society of Mechanical Engineers, standardizační organizace
ASTM	American Society for Testing and Materials, standardizační organizace
BS	British Standards, normalizační organizace
BL	označení pro krycí vrstvu
CAN	Controller Area Network, Mezinárodní organizace pro normalizaci
CO ₂	Oxid uhličitý
CH	Chitosan
DEHS	dietyl-hexylsebacat
DOP	dioktyl ftalát
EN	European Standards, evropská norma
HEPA	high efficiency particulate air filter (vysoce účinný filtr vzduchových částic)
IES	International Electrotechnical Commission, standardizační organizace
ISO	(International Organization for Standardization) Mezinárodní organizace pro normalizaci
KCl	Chlorid draselný
MIL-STD	Military Standard, vojenské normy
MPPS	most penetrating particle size (nejčastěji penetrující velikost částic)
NaCl	Chlorid sodný
LA	kyselina mléčná
PA 6	Polyamid 6
PE	Polyethylen
pH	koncentrace vodíkových iontů
PEO	Polyethylenoxid
PEO _{NaCl}	směs polyethylenoxidu a NaCl
PET	Polyethylentereftalát
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PU	Polyuretan
QF	označení pro faktor kvality
SAE	Society of Automotive Engineers, standardizační organizace v průmyslovém odvětví
SEM	skenovací elektronový mikroskop
TUL	Technická univerzita v Liberci

UL	Underwriters Laboratories, certifikační společnost	
ULPA	(ultra low penetration air filters) – ultra nízká penetrace vzduchu	
VŠCHT	Vysoká škola chemicko-technologická v Praze	
inches w.g.	(Inches Of Water Gauge)- tlakový spád; přepočet – 1 inch w.g. = 248,8 Pa	
M _m	[kg/mol]	molární hmotnost
U	[V]	elektrické napětí
η	[Pa.s]	viskozita
E	[%]	filtrační efektivita filtru
E _s	[%]	střední hodnota efektivit filtru
G ₁	[g]	množství částic, které filtr nezachytil
G ₂	[g]	celkové množství částic
m _p	[g]	množství částic nanesených na filtr, do dosáhnutí tlaku 450Pa
Δp	[Pa]	tlakový spád
P ₁	[Pa]	tlak před filtrem
P ₂	[Pa]	tlak za filtrem
P	[%]	průnik částic vzorkem
U ₁	[mV]	napětí naměřené na testovaném vzorku
U ₂	[mV]	maximální napětí naměřené bez vzorku
X _u	[μm]	Velikost částic naměřených před filtrem
X _o	[μm]	Velikost částic naměřených za filtrem
X	[μm]	Průměrné hodnoty velikosti částic
dX	[μm]	Rozdíl velikosti naměřených částic před filtrem a za filtrem
dN _{up}	[P/s]	Počet částic před filtrem
dN _{down}	[P/s]	Počet částic za filtrem
P	[%]	Penetrace pro jednotlivé velikosti částic
E	[%]	Filtrační efektivita pro jednotlivé velikosti částic
P start	[Pa]	Tlakový spád na začátku měření
P end	[Pa]	Tlakový spád na konci měření

ÚVOD

Populace žijící převážně ve městech a v průmyslových oblastech je stále více vystavena ohrožujícím částicím o nano-rozměrech, které se vyskytují v ovzduší. Tyto nano-částice mohou být dvojího původu, vznikají přírodními vlivy nebo je vytváříme my, lidé. K této situaci nejvíce přispívá automobilová doprava a průmysl celkově. Vdechnutí těchto škodlivých látek může u náchylnější populace způsobit různá onemocnění, především onemocnění dýchacích cest. K zabránění proudění těchto rizikových nano-částic do budov se používají různé klimatizační systémy. Součástí těchto systémů jsou vzduchové filtry, jejichž úkolem je tyto částice zachytávat a tím čistit přiváděný i odváděný vzduch. Jsou místa, kde jsou tyto klimatizace nezbytně nutné, jako jsou nemocnice, laboratoře, elektrárny apod. Například v nemocnicích je velice důležité izolovat pacienty od těchto nebezpečných nano-částic, které by při styku s pacientem mohly způsobit vážné komplikace, jako jsou záněty, infekce apod., tím by se prodloužila a hlavně zhoršila pacientova hospitalizace. Viry, bakterie a další škodlivé částice se mohou do těchto zařízení dostat vzduchem nebo na oděvech a částech těla pacientů nebo pracovníků. Na trhu existují filtry, které dokáží tyto částice zachytit, ale jsou vyrobeny ze syntetických materiálů nebo z různě modifikovaných polymerů. Tato diplomová práce je zaměřena na vývoj biodegradabilního filtru, který bude šetrný k životnímu prostředí. Filtr bude možné tzv. vhodit do volné přírody a působením mikroorganismů se rozloží a nebude tvořit odpad. Filtry dostupné na trhu, mají dostačující filtrační efektivitu, ale jsou z materiálů, které je nutné likvidovat spalováním, to přispívá k vytváření dalších škodlivých nano-částic a tvorbě skleníkového efektu. Cílem práce je odlehčit životnímu prostředí, alespoň v oblasti vzduchové filtrace.

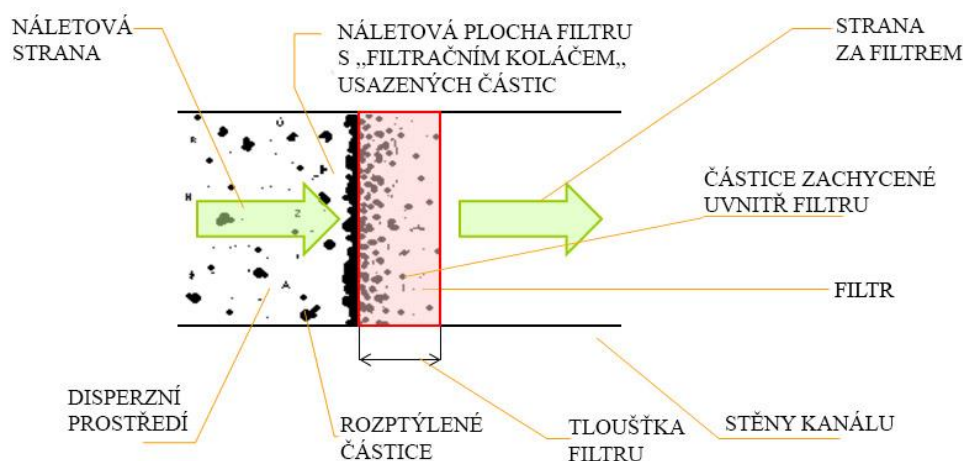
Z výše popsaných důvodů se diplomová práce zabývá vývojem filtračního média, které bude schopné vysoce-účinně odfiltrovat škodlivé nano-částice a zároveň po jeho použití bude lehce ekologicky odbouratelný např. kompostováním. Jako materiál vhodný pro výrobu nano-vláknenné membrány byl vybrán polymerní roztok chitosan/polyethylenoxid (CH/PEO), který byl zvlákněn pomocí elektrostatického zvláknování na dva různé substráty, (i) na netkanou textilii vyrobenou technologií spun-bond a (ii) na netkanou

textilii technologií melt-blown. Jako Surovina pro výrobu melt-blownu byl zvolen biodegradabilní kopolymer připraven ze směsi polyethyltereftalátu a kyseliny mléčné vyrobený na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze (VŠCHT). Spojením těchto dvou komponent biodegradabilního melt-blownu a nano-vláknenné membrány ze směsi CH/PEO a následným procesem výroby, vznikl filtr, který by měl být zcela biodegradabilní. Závěrem experimentu byl zrealizován test biodegradability, kde se ověřilo, zda bude vytvořený filtr schopný rozkladu v přírodě.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Filtrace

Filtrací se rozumí proces, kterým jsou z disperzního prostředí oddělovány rozptýlené částice pomocí porézního média. Disperzní prostředí je plynné - vzduch nebo kapalné, jako například voda, olej a další. Částice, které jsou oddělovány, mohou být pevné nebo kapalné. Jako porézní médium může být použit filtrační papír, který se hlavně využívá v laboratořích. Dále jako porézní médium může také posloužit textilie nebo písek, který se používá ve většině případů pro čištění odpadních vod [1, 2].



Obr.1: Schéma procesu filtrace [3].

1.1.1. Rozdělení filtrace

Filtrace se může dělit podle prostředí, podle velikosti částic a podle principu filtrace.

Podle **prostředí** se filtrace rozděluje na:

- kapalinovou
- vzduchovou

Kapalinová filtrace zahrnuje čištění pitné vody, odpadních vod, používá se pro automobilové filtry, olejové filtry a filtry pohonných hmot. U této filtrace se využívá plošný způsob filtrace, převážně síťový jev viz kapitola Filtrační mechanismy filtrace. Zbylé mechanismy filtrace se zde neuplatňují z důvodu velkých sil daných proudící kapalinou.

Vzduchová filtrace se používá například v klimatizacích a v systémech pro ventilaci vzduchu. Dále pro filtry do vysavačů nebo automobilů. Zde se používají oba základní způsoby filtrace a to v závislosti na filtračních parametrech, jako jsou velikost částic a rychlost jejich pohybu [1].

Podle **velikosti filtrovaných částic** se filtrace rozlišuje jako:

- makrofiltrace (částicová filtrace): velikost částic ($vč$) $> 1 \mu m$
- mikrofiltrace: $1 \mu m > vč > 100 nm$
- ultrafiltrace: $100 nm > vč > 10 nm$
- nano-filtrace: $10 nm > vč > 1 nm$
- reverzní osmóza: $1 nm > vč$

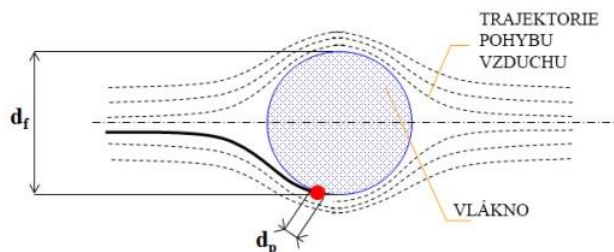
Velikost Částic [μm]	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000
Filtrační technologie								
								Částicová filtrace
								Mikrofiltrace
								Ultrafiltrace
								Nanofiltrace
								Hyperfiltrace

Obr. 2: Příklady filtrovaných částic, jejich velikost a druhy filtrace [1].

Filtrační mechanismy filtrace

Přímý záchyt

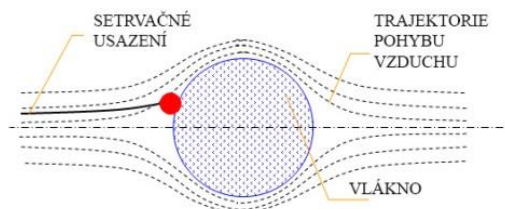
Částice plyne shodně s disperzním prostředím. Hned jak se částice dostane do blízkosti vlákna, to je na vzdálenost rovné jejímu poloměru, tak se zachytí na jeho povrch. Mechanismus neovlivňuje rychlost proudění vzduchu.



Obr.3: Přímý záchyt [4].

Setrvačné usazení

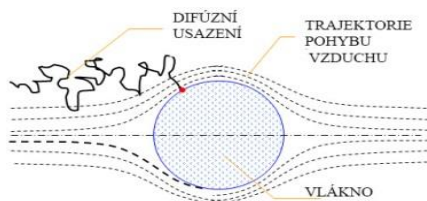
Částice s velkou hmotností a rychlostí nesledují proudění vzduchu, neplynou shodně s disperzním prostředím, rovnou narážejí na povrch vlákna.



Obr. 4: Setrvačné usazení [4].

Difúzní usazení

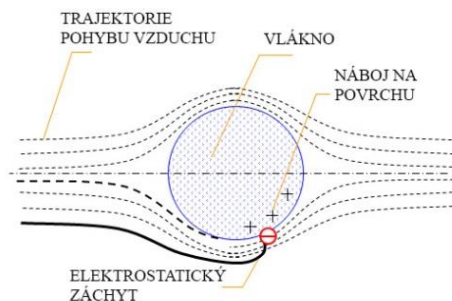
Částice vlivem Brownova pohybu nekryjí proudění vzduchu (zakřivení proudnic) a pronikají přímo k povrchu vlákna. Difúzní usazení se zvyšuje s klesající rychlostí pohybu částic.



Obr. 5: Difúzní usazení [4].

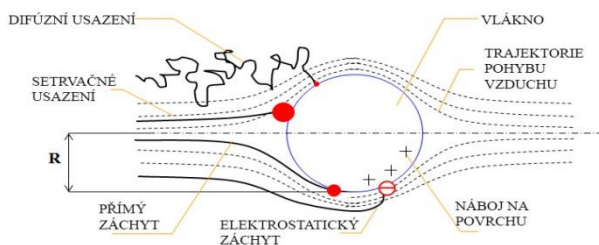
Elektrostatické usazení

Jak částice, tak vlákna ve filtru mohou nést elektrický náboj. Náboj, na povrchu vlákna vlivem přitažlivých sil zachytává částice. Díky tomu je trajektorie pohybu částic zakřivená směrem k vláknu.



Obr. 6: Elektrostatické usazení [4].

Na obr. 7 Je vidět model, jak se přibližuje částice k povrchu vlákna. Jsou zde znázorněny všechny mechanismy v jednom obrázku. Jakmile přijde částice do kontaktu s vláknem je zachycena pomocí Van der Walsových sil, elektrostatických sil a sil, které vyvolává povrchové napětí [4].



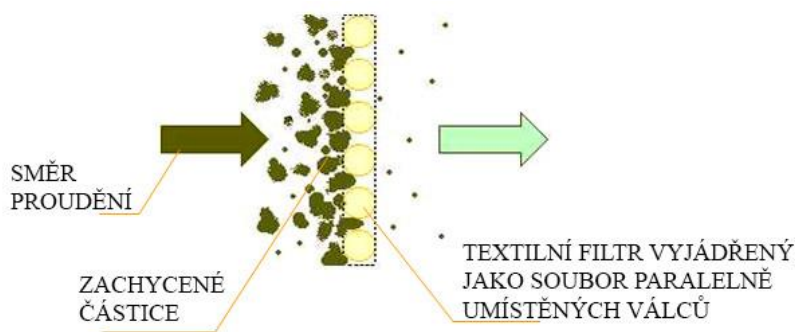
Obr.7: Mechanismy hloubkové filtrace [4].

Dle **principu filtrace** se rozlišuje filtrace povrchová (plošná) a hloubková.

Povrchová filtrace

U plošné filtrace se využívá filtrační mechanismus tzv. síťový jev. Princip funkce povrchové filtrace lze přiřadit k funkci prosívání přes síto, kde jsou zachyceny částice, které jsou větší než oka síta a jsou zachyceny se 100%-ní účinností. Částice, které se zachytí na povrchu síta, jsou s touto oblastí v přímém kontaktu. V prosévání je důležité a pro výsledek rozhodující je velikost oka síta. Tloušťka v tomto případě není důležitá. Pokud jsou dána nad sebou stejně veliká síta, tak výsledek zachycení při prosévání je stejný, jako by se použilo jen jedno síto. Význam zde hraje povrch síta neboli jediná rovina, při které zachycené částice přijdou do kontaktu s povrchem síta. Na stejném principu je založen mechanismus plošné filtrace. Filtr zachytí všechny částice, které jsou větší než prostory mezi vlákny. Jak bude filtr efektivní v zachytávání částic, je závislé na velikosti pórů textilie. Pokud je známa velikost zachytávaných částic, je možné odhadnout se 100 %-ní účinností, které částice budou zachyceny. Problémem zůstává velikost póru, jak ji definovat a to, že se pórovitost filtru během filtrace mění.

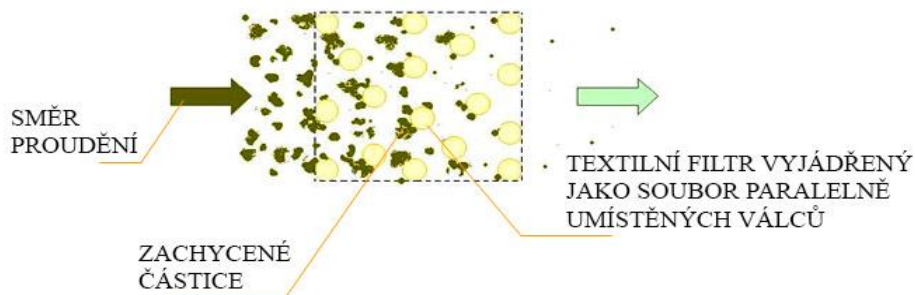
Typické filtrační materiály, kde se uplatňuje právě síťový jev, jsou: spun-bond, tkanina, u které lze velikost póru nastavit pomocí dostavy, případně zátěrem, vpichovaná textilie se zátěrem, natavená, nebo lisovaná za tepla, případně jiný typ netkané textilie lisované za tepla [4].



Obr. 8: Povrchová filtrace [3].

Hloubková filtrace

U hloubkové filtrace se využívají filtrační mechanismy – přímý záchyt, setrvačné usazení, difúzní záchyt a elektrostatický záchyt. Pro hloubkovou filtraci je charakteristické to, že zachytávané částice jsou menší, než mezivláknenné vzdálenosti. Částice jsou na povrchu vlákn přichyceny pomocí mezipovrchových sil mezi vláknem a částicí. Jak moc bude filtr účinný, závisí na jeho tloušťce. To znamená, že s tloušťkou filtru roste jeho účinnost. Základní model filtru se skládá z několika jednotlivých vrstev a ty jsou na sobě nezávisle obaleny vláknennou hmotou. Lze říci, že filtr je vysoce účinný, i když jednotlivé vrstvy mají malou účinnost. Pro představu je uveden filtr, který je tvořen například ze sto vláknenných vrstev, z toho každá jednotlivá vrstva je schopna zachytit pouze 5 % dopadajících částic. Filtr složený ze sto vrstev bude jako celek zachycovat 99,4 % dopadajících částic. Při hloubkové filtraci je najednou uplatňováno více filtračních mechanismů. Materiály, které se převážně používají u hloubkové filtrace, jsou melt-blown, vpichované textilie, spunlace, objemné netkané textilie pojené termicky, chemicky [4].



Obr. 9: Hloubková filtrace [3].

1.2. Parametry filtrace

Je důležité rozlišovat průběh filtrace, s tím související parametry a konečné užité vlastnosti filtru. Hodnoty filtračních vlastností mohou být měněny veškerými parametry filtrace, které vystupují jako proměnné hodnoty. Jestliže dochází k zaplňování filtru zachycenými částicemi, pak během filtrace dochází ke změně vlastností. Tomu se musí přizpůsobit i způsob testování [1].

Proces filtrace lze popsat jako vztah mezi vstupními parametry (filtrační proměnné) a filtračními vlastnostmi výslednými. Není jednoduché popsat vztah mezi filtračními vlastnostmi a filtračními proměnnými, které ovlivňují právě probíhající filtrační proces.

Filtrační proměnné - vstupní parametry, které se dají nastavit nebo změřit.

- **Parametry filtru** - plocha, tloušťka, plošná a objemová hmotnost, stejnoměrnost materiálu, použitý materiál a jeho parametry jako objemová hmotnost, elektrická vodivost, odolnost vůči negativním vlivům, parametry vláken jako jejich průměr, tvar, jemnost, orientace v prostoru
- **Parametry protékajícího média** (disperzního prostředí) - velikost částic disperzního podílu, distribuce velikosti částic disperzního podílu, koncentrace částic, tvar a povrch částic, objemová hmotnost částic, elektrické vlastnosti
- **Parametry procesu filtrace** - rychlost náletu částic na filtr, viskozita protékajícího média, teplota, tlak, vlhkost [1].

Filtrační vlastnosti - vlastnosti filtru, kterých se snažíme dosáhnout.

- Efektivita
- Tlakový spád
- Živostnost filtru
- Porozita

Efektivita filtru

Neboli účinnost filtru. Vyjadřuje poměr částic zachycených na filtru ku poměru celkových částic, které se vyskytují ve vzduchu před vstupem na filtr. Efektivita filtru je dána vztahem (1).

$$E = \left(1 - \frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Přitom platí, čím je efektivita vyšší, tím je filtr účinnější. Písmeno G_1 udává množství částic, které filtr nezachytil, tzn., že částice pronikly skrz filtr. G_2 značí celkové množství částic. Výraz G_1/G_2 se nazývá průnik filtru. Efektivita je vyjádřena v procentech.

V důsledku zanášení filtru částicemi, se pak v průběhu filtrace mění efektivita. Vyšší efektivita je způsobena tím, že když se na povrchu vláken filtru zachytí a usadí částice, tak ty následně sami o sobě slouží jako filtr.

Tlakový spád

Pomocí tlakového spádu lze vyjádřit odpor filtru vůči toku disperzního prostředí. Dále se zjistí rozdíl tlaku před filtrem a za filtrem. Tlakový spád lze vyjádřit rovnicí (2), kde p_1 vyjadřuje tlak před filtrem a p_2 udává tlak za filtrem. Je žádoucí nalézt filtr, který bude mít vysokou efektivitu a nízký tlakový spád.

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Během procesu filtrace dochází k zanášení filtru zachycenými částicemi, tím se mění tlakový spád. Růst tlakového spádu zpravidla udává životnost filtru. Tlakový spád může narůst až do takové míry, kdy se filtr poškodí. Další možnost je, že již zachytil takové množství částic, kdy už není možné disperzní prostředí transportovat přes filtr.

Životnost filtru

Je doba, kdy se musí filtr odstranit. Životnost filtru tedy vyjadřuje, jak dlouho, se filtr může používat. Životnost lze zjistit z množství částic zachycených na filtru do té doby, než

tlakový spád naroste nad kritickou hodnotu. Je určena rychlostí zanášení filtru a koncentrací částic před filtrem. Pro určení životnosti se používá vztah (3).

$$J = E_s \cdot m_p \quad (3)$$

Parametr E_s vyjadřuje střední hodnotu efektivity a za m_p se dosadí množství částic nanesených na filtr do té doby, než se dosáhne hodnoty 250 respektive 450 Pa. Pokud je známa koncentrace částic, tak je z ní možné odhadnout životnost filtru [3].

1.3. Metody testování filtračních vlastností

U filtrů jsou důležité tyto výsledné vlastnosti: efektivita, dílčí efektivita pro jednotlivé velikosti částic, tlakový spád, vztah mezi průtokem a tlakovým spádem, životnost a mohou být i další. Existuje více metod pro testování filtrů. Metody se liší typem filtrovaných částic (velikost, koncentrace...), parametry procesu filtrace (teplota, rychlost...) a způsobem detekce částic.

Metoda	Název normy	Testovací materiál	Průměr částic (μm)	Technika přípravy test. Mat.	Detektor proniknuvších částic
DOP test	ASTM ASME/ANSI IES MIL-STD UL	Dioktyl ftalát (syntetický olej)	0,3 0,2 – 0,3	Vypařování, kondenzace	Spektrofotometr Penetrometr Optický počítač částic
Test syntetickým prachem	ANSI/AHAM	Prach z Arizonských silnic	0,5 - 3	Aerosolový generátor	Aerodynamický třídič částic
	ASHRAE EN CAN	72% jemný prach 23% molocco black 5% cotton linters	-	Dávkovač prachu, injektor	vážením
	ISO SAE	Testovací prach	2 – 125 10 - 40	injektor	vážením
Test atmosférickým prachem	ASHRAE EN CAN	Atmosférický aerosol	Cca. 0,3	Přímo ze vzduchu	Opacitometr (propustnost světla)
Aerosolem NaCl	BS	Částice NaCl	0,02-2 medián 0,6	Rozprašení roztoku a vysušení	spektrofotometr
Test methylenovou modří	BS	Částice metylénové modří	-	Rozprašování vodního roztoku	Velikost skvrny

Tab. 1: Testovací metody pro vzdušnou filtraci [1].

Syntetický prach

Tímto prachem se rozumí částice na bázi křemíku, které svým charakterem, hlavně velikostí, odpovídají prachu, který se nachází v okolí Arizonských silnic. Částice mají velikost od 0,2 do 10 μm . Je možné do směsi prachu ještě přidat i organické látky, například saze, krátká celulózová vlákna a jiné. Měření probíhá vážením prachu před a za filtrem. Používá se pro hrubé filtry (třídy G), z části i pro jemné filtry (třídy F) a předfiltry [4].

Atmosférický prach

U této metody se testují částice prachu ve vzduchu. Pomocí počítače jsou zjištěny velikosti a množství částic před filtrem a za filtrem. Tato metoda se v současné době nepoužívá a je nahrazena dietylnhexylsebacat (DEHS) aerosolovou metodou, protože se složení atmosférického vzduchu mění [4].

Olejové aerosoly

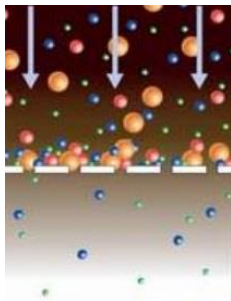
Částice olejů se testují rozprašované. Nejznámější testované látky jsou dioktyl ftalát (DOP), DEHS a parafrinový olej. Rozlišují se olejové aerosoly studené a horké. Pokud je olej rozprašován a sušen za studena, pak je rozsah velikostí částí širší. Jestliže se, ale olej rozprašuje a suší za tepla, pak vznikají částice monodisperzního aerosolu (0,1 – 0,3 μm). Množství a velikost částic je poté testována na laserovém počítači nebo spektrofotometricky. Kromě parafrinového oleje, lze zjistit efektivitu dané velikosti částic. Tento způsob je vhodný pro jemné filtry HEPA (vysoká účinnost vzduchového filtru) a ULPA filtry (ultra nízká penetrace vzduchového filtru) [4].

NaCl test

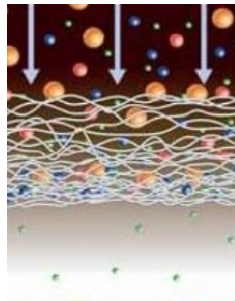
Roztok NaCl o koncentraci 10% je rozprašen do vypařovací trubice, kde se voda vypaří, a zůstanou samotné krystaly soli o rozměrech nanometrů. Tyto částice pak zadanou rychlostí nalétávají na testovaný filtr, přičemž je získáván tlakový spád, filtrační efektivita a množství částic [1].

1.4. Typy filtrů

Filtry se dělí do dvou kategorií podle hloubky průniku na ploché a hloubkové (obr. 10 a 11).

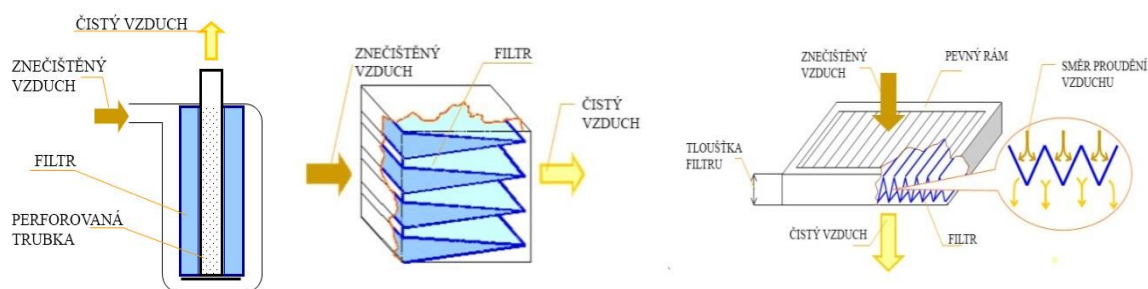


Obr. 10: Ploché filtry



Obr. 11: Hloubkové filtry [5].

Dále podle tvaru filtru lze rozlišovat filtry na skládané, svíčkové, kapsové, viz obr. 12 [1].



Obr. 12: Druhy filtrů; zleva: svíčkový, kapsový, skládaný [1].

1.5. Nejčastěji používané materiály k výrobě vzduchových filtrů

Filtrační médium z polyuretanu

Filtr je vyroben jako měkká pěnová hmota a má vysokou odolnost proti vlhkosti, proti namáhání. Používá se jako předfiltr nebo 1. stupeň filtrace do klimatizací a větracích zařízení. Likviduje se skládkováním nebo spalováním.

Filtrační médium z přírodního latexového vlákna

Tento filtr slouží pro filtraci hrubých prachových částic. Používá se v potravinářství a v lékařství. Likviduje se skládkováním nebo spalováním.

Filtrační médium ze syntetických vláken

Filtr vyrobený jako neuspořádaná netkaná vrstva, která je zpevněná umělým pojivem. Použití jako předfiltr nebo 1. stupeň filtrace do klimatizací a větracích zařízení. Filtrace hrubých prachových částic. Likviduje se skládkováním nebo spalováním [6]. Nejčastěji jsou filtry vyrobeny z polyesterových vláken, mohou být upraveny oleohydrofobní úpravou nebo antistatickou úpravou pro lepší zachycení částic. Pro vyšší účinnost a životnost se vyrábějí polyesterové filtry s PTFE membránou [7].

Filtrační médium ze skelného vlákna

Je složeno z vrstvy neuspořádaných elastických skelných vláken zpevněných pojivem. Skelná vlákna mají vysokou tepelnou odolnost a jsou nehořlavá. Oproti filtrům z celulózových vláken mají filtry ze skelných vláken až pět krát vyšší účinnost a životnost. Použití se liší dle typu filtru. Filtr může být opatřen impregnací pro lepší vázání prachu. Likviduje se skládkováním nebo spalováním [8].

Filtrační médium z recyklovaného papíru

Je sestaveno ze dvou skládaných kartonů, které jsou v ohybech slepeny. Vzduch proudící skrz filtr mění své proudění ve všech osách. Použití jako předfiltr. Likviduje se skládkováním nebo spalováním [9].

1.6. Biodegradabilní polymer

Syntetické polymery nelze biologicky rozložit a tak končí ve spalovnách. Spalování přispívá ke tvorbě skleníkových plynů a uvolňování dalších toxických látek. Syntetické polymery častěji končí na skládkách a tvoří zátěž pro další generace.

Výhodou biodegradabilního polymeru je jeho rozklad působením mikroorganismů. Bakterie, houby a řasy působí na polymer a rozloží ho na oxid uhličitý, vodu, metan a zbytkovou biomasu. Biodegradabilní polymery nezatěžují životní prostředí, neboť netvoří odpad. Jsou tedy recyklovatelné a nejsou toxické. Tyto polymery lze zařadit do obnovitelných zdrojů. Jsou nevyčerpatelné a v budoucnosti by mohli nahradit zdroje neobnovitelné. Faktory, které brzdí vývoj biodegradabilních polymerů je jejich vysoká počáteční cena, obtíže při jejich zpracování a nižší mechanické vlastnosti. Proč rozvíjet výzkum těchto polymerů je prostý, jejich výroba je šetrnější k životnímu prostředí. U

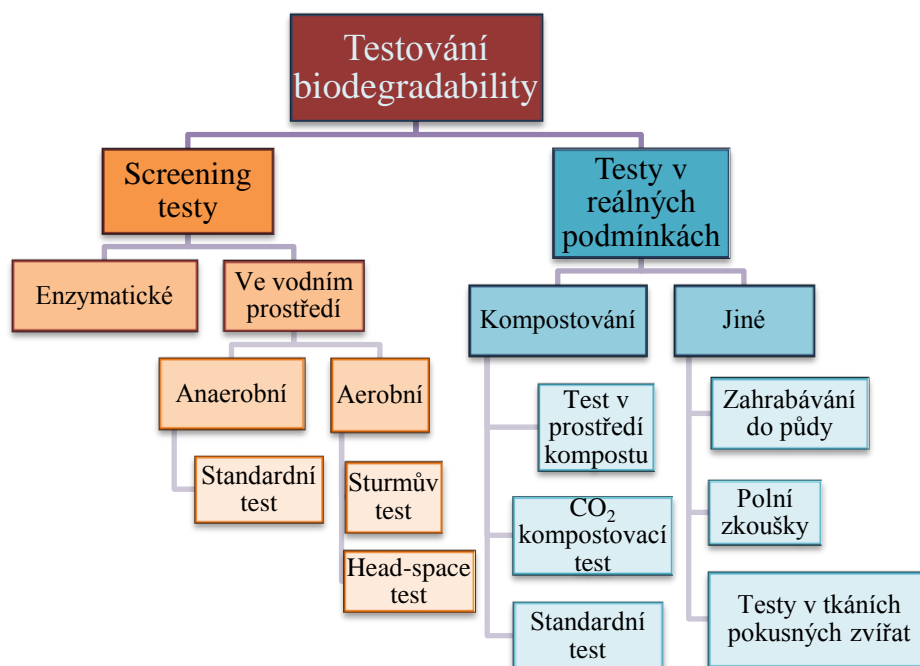
většiny polymerů není nutné používat organická rozpouštědla, to šetří životní prostředí i snižuje nebezpečí ohrožení pracovníků ve výrobě. Zároveň biomasa, která vzniká při rozkladu, se dále využívá, například jako ekologické palivo.

Chemické a fyzikální vlastnosti, které způsobují jejich biodegradabilitu, jsou na druhou stranu omezením pro jejich běžné použití. Afinita k vodě, jedna z vlastností těchto polymerů, způsobuje omezení k jejich dalšímu použití, to se týká např. škrobu. Celulóza a chitin jsou nerozpustné ve vodě a proto je nelze zpracovávat klasickými technologiemi. Tyto nedostatky lze odstranit např. síťováním polymeru, použitím aditiv a dalšími modifikacemi. Jakákoli speciální úprava polymeru způsobuje komplikace v jeho rozkladu [10].

Výroba filtrů z biodegradabilního polymeru, který je považován za spotřební materiál a je nutné ho často vyměňovat, by jistě k ochraně životního prostředí velmi pomohla.

1.7. Test biodegradability polymeru

Biodegradaci ovlivňují faktory prostředí, jako jsou teplota, živiny, světlo, vlhkost, pH a přítomnost kyslíku. Biodegradace může být způsobena například procesy, které jsou znázorněny na následujícím obr. 13. Metody testování biodegradability polymerů jsou zastoupeny tak, aby pokrývaly téměř všechny možnosti, kde plasty po svém upotřebení skončí.



Obr. 13: Rozdělení biodegradabilních testů [11]

Test v prostředí kompostu

Pomocí tohoto testu lze stanovit stupeň biodegradability různých plastů. Test nabízí i porovnání výsledků biodegradability jednotlivých plastů. Stupeň biodegradace (zkompostování) je určen pomocí úbytku hmotnosti vzorku. Během celého testu jsou měřeny tyto faktory: teplota, pH, relativní zásoba kyslíku v kompostu a produkce oxidu uhličitého. Prostředí, kam se vzorky umístí – kompostér je uzpůsoben tak, aby se dalo najednou testovat až desítky vzorků. Z biodegradabilního polymeru se odříznou kousky vzorků a každý vzorek je zvážen a jeho hmotnost zapsána. Vzorky se vloží do kompostéru. Před jejich zahrabáním se musí každý vzorek označit, aby po jejich vytažení bylo jasné, jakou měl vzorek před testováním hmotnost. Na kompostér je důležité napsat datum a čas, kdy byly vzorky zahrabány. Po uplynutí například jednoho měsíce se vzorky z kompostu vyndají a zváží. Z úbytku hmotnosti se následně stanoví průběh biodegradace vzorku [11].

1.8. Nano-vlákna

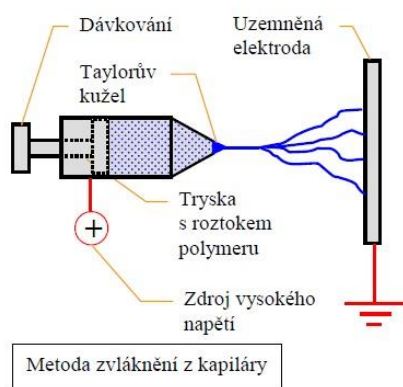
Mezi nano-vlákna se řadí taková, která dosahují průměrů v rozmezí od 1 – 1000nm. Při výrobě nano-vláken se běžně dosahuje průměrů 50 – 500nm. Pod klasickým mikroskopem nano-vlákna nejsou viditelná, protože jejich průměr je menší, než vlnová délka světla. Bližší pozorování těchto tenkých vláken je možné pomocí elektronového mikroskopu (SEM). Nano-vlákna se běžně jako samostatná vlákna nevyskytují. Používají se tak, že jsou uspořádána do strukturních a prostorových celků, s nimiž lze snadno manipulovat např. membrány, kompozitní materiály atd. [12]. Mezi vlastnosti nano-vláken se řadí velký měrný povrch, velká pórovitost, malá velikost pórů (zaručuje dobrou prodyšnost), vysoký objem pórů, výborné mechanické vlastnosti v poměru k jejich hmotnosti [13].

1.9. Elektrostatické zvlákňování

Ze všech typů pro výrobu nano-vláken je elektrostatické zvlákňování tím nejběžnějším způsobem výroby, kde na viskoelastickou kapalinu (většinou se jedná o roztok polymeru) je aplikováno vysoké napětí, aby se získal elektricky nabitý polymerní roztok. Výhodou tohoto procesu je, že se takto zpracovávají nejen polymery, které lze zvlákňovat z taveniny, ale také polymerní roztoky [12, 14].

Principem této metody je vytvoření elektrostatického pole, které vzniká mezi dvěma elektrodami. Vysoké napětí se vytvoří mezi kapilárou a kolektorem. První elektroda je tvořená úzkou kapilárou, což je zvlákňovací tryska. Kapilára je elektricky nabitá a svůj náboj přenáší do polymerního roztoku, který pak zvlákňuje. Druhá elektroda se nazývá kolektor, je umístěna proti vrcholu kapiláry a zachytává nano-vlákna.

Mezi špičkou kapiláry a kolektorem vlivem vysokého napětí vzniká Taylorův kužel (ze kterého jsou produkována nano-vlákna), který je tvořen přímo na špičce kapiláry. Důsledkem elektrického pole, se nabitý proud polymerního roztoku zrychluje, ztenčuje a v poslední fázi narazí na uzemněnou protielektrodu, kde se zachytí. Při tvorbě nano-vláken během celého procesu se rozpouštědlo z polymerního roztoku postupně odpařuje, díky čemuž nano-vlákna tuhnou [12, 14].



Obr. 14: Elektrostatické zvlákňování z jehly [15].

Výrobu nano-vláken ovlivňují parametry procesní, které mají vliv především na tvorbu vláken a systémové parametry, které se zabývají vlastnostmi zvlákňovaného materiálu.

Procesní parametry zahrnují elektrickou vodivost, intenzitu elektrického pole, vzdálenost kolektoru od zvlákňovací trysky, dále okolní parametry, mezi které lze zařadit teplotu, vlhkost a rychlost vzduchu. *Systémové parametry*, což jsou vlastnosti zvlákňovaného materiálu, jsou například molekulová hmotnost polymeru nebo koncentrace polymerního roztoku. Koncentrace ovlivňuje viskozitu, povrchové napětí a elektrickou vodivost polymerního roztoku. Růst koncentrace polymerního roztoku znamená větší průměry výsledných nano-vláken. Stejně tak vyšší viskozita způsobuje větší průměry nano-vláken [16].

Nano-vlákna vytvořená metodou elektrostatického zvlákňování lze využít pro kompozitní filtrační nebo biomedicínské aplikace, ochranné roušky a respirátory, elektrické a optické aplikace, solární plachty a další [17].

Filtrační aplikace

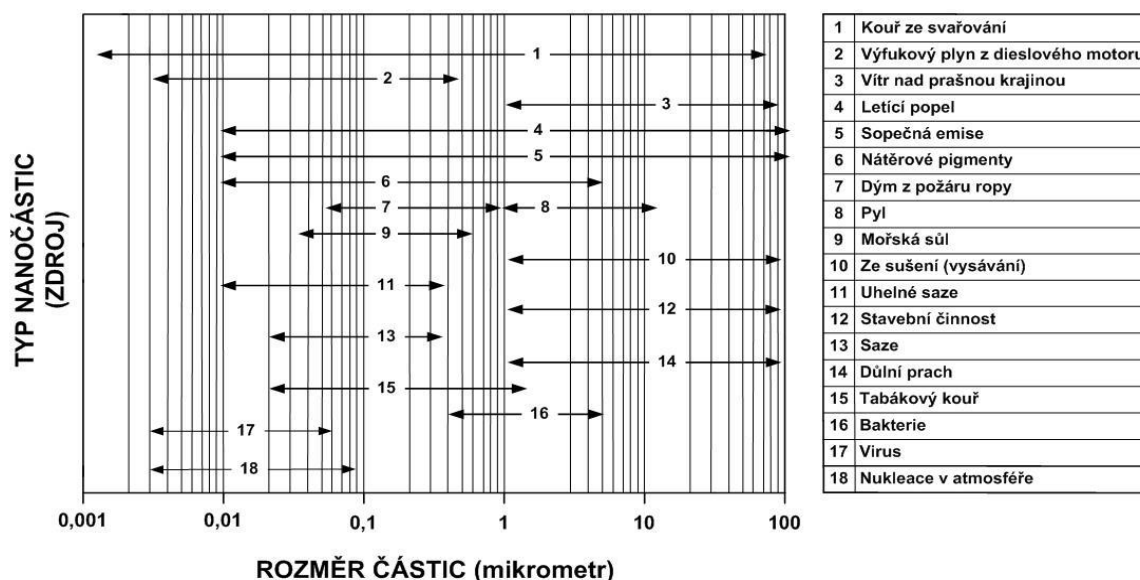
Pro výrobu běžných filtrů se používají netkané textilie vyrobené technologií melt-blown a spun-bond nebo jejich kombinací. Filtry se používají převážně v průmyslovém odvětví. Jak jsou filtrační materiály účinné, to souvisí s jemností vláken. Díky elektrostatickému zvlákňování je možné vyrobit vlákna v submikronovém rozsahu a filtrační materiály jsou pak schopné odfiltrovat například bakterie, viry nebo cigaretový kouř. Velikost bakterií se pohybuje v řádu od 1000 nm do 10 000 nm. Viry, které jsou podstatně menší, než bakterie mají velikost pohybující se od 5 nm do 100 nm. Díky vysokému měrnému povrchu a vysoké povrchové kohezi je viditelně lepší zachycení částecek menších než 0,5 μm . Tím se zlepšuje účinnost filtru. Pro další vylepšení filtrů lze polymerní nano-vlákna elektrostaticky nabít. Tento krok umožní schopnost elektrostatické přitažlivosti částic bez zvýšení tlakového spádu [12, 16, 18].

Na udržení čistoty ovzduší jsou kladeny vysoké nároky. Neustále jsou hledány efektivnější filtrační materiály, které jsou schopny zadržet mikročástice, bakterie a viry. Vzduchové filtry s nano-vláknem jsou schopny zachytit více nečistot než běžné vzduchové filtry. Nano-vlákna nebrání průchodu proudícího vzduchu skrz filtr, jak dokazuje studie [19]. Pokud se do filtračního substrátu přidá jen malé množství nano-vláken, získá se o několik řádů vyšší filtrační efektivnost při současně nižším tlakovém spádu. Díky nano-vláknům získá filtr vysokou pórovitost s malou velikostí pórů. To brání prostupu mikročásticím skrz filtr.

Podle zvoleného typu polymeru, který se použije při zvlákňování, lze vyrobit hydrofobní nebo hydrofilní materiál. Tím se nabízí možnost širokého využití nano-filtrů. Nano-filtry uživatelům zaručují snížení provozních nákladů a to dosažením nižší spotřeby energie a nižšími náklady na servis a údržbu zařízení [20]. Filtry s nano-vláknennou membránou přinášejí vyšší komfort hlavně pro lidi trpící na alergie a pro lidi citlivé na prach, pyl apod. Dále zlepšují čistotu interiéru.

1.10. Rizika nano-částic

Do prostředí se nano-částice mohou uvolňovat cíleně nebo jako vedlejší produkt, který vzniká při přírodních nebo antropogenních procesech.



Obr.15: Rozsahy velikosti nano-částic uvolněné z přírodních a antropogenních zdrojů [22].

Nano-částice se mohou uvolňovat mechanickou cestou, např. broušením, řezáním atd. Jsou přítomny všude tam, kde se jakýmkoliv způsobem práší, například to mohou být provozy na obrábění kovů, opracování dřeva, svařování, broušení atd. Dále vznikají jako produkty ze spaloven a z průmyslu obecně. Ohrožují například hasiče, kteří s nano-částicemi přicházejí každý den do styku při požárech. Nano-částice ve formě aerosolu, který se přenese do ovzduší, představují zvláštní riziko především při vdechnutí. Aerosol se následně dýchacím ústrojím transportuje do dalších koncových orgánů. Řada studií zaměřených na tuto tematiku dokazuje, že inhalované nano-částice způsobují u náchylné populace kardiovaskulární a respirační onemocnění. Velké postavení v uvolňování emisí nano-částic do ovzduší především ve městech má na svědomí hlavní zdroj znečištění vzduchu a to je automobilová doprava [22]. Nejčastěji uvolňované emise jsou saze (elementární uhlík) a oxidy železa. Dieslové motory uvolňují saze o velikostech kolem 50nm, což je nejrizikovější velikost částic a to proto, že jsou schopny překonat ochrannou bariéru buňky. Řešením je stálý vývoj a výzkum materiálů, které jsou schopné zachytit a omezit výskyt emisí nano-částic [21].

1.11. Poslední výzkum a vývoj použití nano-vláknenných vrstev ve vzduchové filtraci

Ve studii zaměřené na aplikaci nano-vláken ve vzduchových filtrech se zabývají Podgorski a kol. problematikou zlepšení účinnosti filtrů pomocí aplikace nano-vláken [23]. Filtry vyrobené z mikrovláken jsou schopné zachytit aerosolové částice o velikosti 100 až 500 nm. Jednoduché teoretické výpočty předpovídají, že účinnost filtračního média může být značně zvýšena aplikací nano-vláknenné vrstvy. Hlavním cílem jejich studie bylo ověřit, zda jsou očekávané výsledky splněny a zda předpoklad zvýšené účinnosti filtru nezpůsobil nadměrný tlakový spád. Za tímto účelem byla vyvinuta upravená technologie melt-blown, která umožnila výrobu vláken v rozsahu mikrometrů i nano-metrů. Byl zkoumán jeden filtr z mikrovláken a pět nano-vláknenných filtrů. Pro všechna testovaná média byly stanoveny tyto charakteristiky – pokles tlakového spádu a s jakou účinností se odstraní aerosolové částice s průměrem 100 – 500 nm. Výsledky experimentu potvrdily, že použití nano-vláken ve filtru významně zvýší jeho účinnost, přičemž tlakový spád roste přiměřeně. Dále bylo zjištěno, že použití více vrstev nano-vláknenných filtrů ve spojení s podkladovou vrstvou z mikrovláken je výhodnější z hlediska kvality. Porovnáním teoretické a vypočítané účinnosti filtru se zjistilo, že teoretická hodnota je mírně nadhodnocená. Bylo zjištěno, že nehomogenita filtru má silně negativní vliv na filtrační účinnost, proto je žádoucí vyrábět nano-vláknenné filtry pokud možno homogenní. Závěrem je možné říci, že nano-filtry vyrobené technologií melt-blown jsou velmi perspektivní a ekonomicky výhodné k posílení filtrace s problematikou aerosolových částic.

Porovnáním experimentálních dat s předpovědí klasické jedno-vláknenné teorie hloubkové filtrace bylo zjištěno, že tato teorie se dobře hodí pro filtry z mikrovláken, ale pro nano-vláknenná média je silně přeceňována. To může být způsobeno nehomogenitou filtrační struktury a různými velikostmi jednotlivých nano-vláken. Lepší odhad filtrační účinnosti může být získán z odporu ekvivalentního průměru vlákna a z měření tlakového spádu. Nakonec je doporučena třívrstvá konstrukce filtru, která je zaměřena na odstranění částic různých velikostí i nano-částic. Podkladová vrstva by měla být spíše tenčí a plnější, vyrobená z vláken o větším průměru v řádu desítek mikrometrů. Její úloha je zajistit řádnou mechanickou pevnost a celkovou odolnost při filtraci. Střední vrstva by měla být složena z nano-vláken, vrstva může být silnější, ale mnohem více porézní a bude určena

k zachytávání nejvíce pronikavých částic v submikronové velikosti. Vrchní vrstva může být vyrobena z vláken se střední velikostí v řádu několika mikrometrů. Tato vrstva by měla být porézní a silnější než vrstva podkladová. Plní funkci mechanické ochrany pro nano-vlákennou vrstvu a zabraňuje jejímu rychlému ucpání [23].

V posledních desetiletích se funkční membrány staly novou technologií využívanou v mnoha oblastech životního prostředí, potravin a biomedicíny. Hlavní výhodou membrán je, že se s nimi pracuje bez přidání chemikálií, s relativně vysokou účinností a nízkou spotřebou energie a řízeným procesem. Proto se široce využívají v biotechnologii, při výrobě potravin a nápojů, při filtraci vzduchu a v lékařství např. pro pacienty s dialýzou.

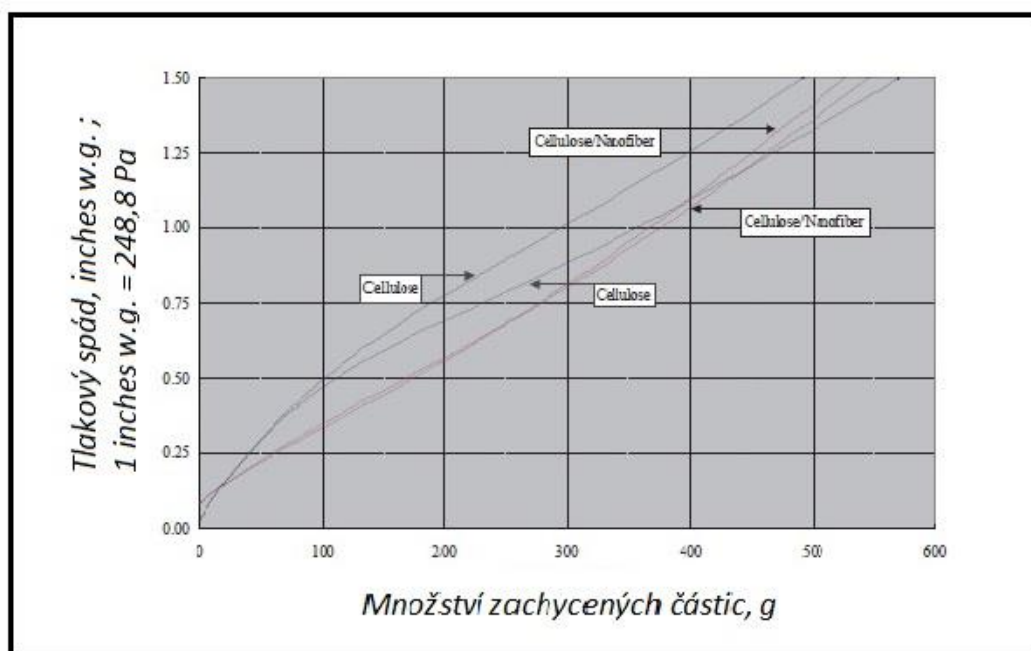
Ve studii Trendy v aplikaci nano-vláken a jejich vhodnost použití pro vzduchovou filtraci se Balamurugan a kol. zabývají současným výzkumem a pokrokem využití nano-vlákenných membrán ve vzduchové filtraci.

V současné době jsou skleněné filtry a filtry z uhlíkových vláken široce používány ve vzduchové filtraci. Použití skleněných vláken stále způsobuje ekologické a zdravotní problémy, které vycházejí hlavně z mechanické recyklace a z likvidace spalováním (tepelné recyklace). Jako materiály šetrné k životnímu prostředí a možná alternativa za skleněná vlákna, by byly vhodné kompozitní materiály na bázi přírodních vláken. Jedno z omezení filtrů HEPA je, že se nedají použít pro filtraci chemicky kontaminovaného vzduchu. To by se dalo překonat použitím polymeru na bázi nano-vláken s inkorporovanými nano-částicemi. Takové filtry nejen že mohou zlepšit účinnost filtrace, ale také dobu filtrace, neselektivní dekontaminační efektivnost a váhovou redukci filtru. Katalyzátory pro dekontaminaci chemických a biologických látek se začínají rozvíjet v letectví a v průmyslu. Dalším z hlavních problémů, kterému teď svět musí čelit, je nedostatek pitné vody. Hledají se nové a lepší technologie v oblasti čištění vod. Tenké nano-kompozitní membrány vyvinuté v tamní laboratoři vykázaly vyšší průtok vyčištěné vody v porovnání s komerčními membránami. Ukázalo se, že snížení tloušťky membrány a průměru vláken, může zlepšit tok kapaliny skrz filtr. Následující generace membrán pro aplikace v odpadních vodách bude založena na nano-vlákenných membránách, které budou efektivnější z hlediska nákladů a úspory energií. Nedávné pokroky v přípravě nano-vlákenných membrán otevřely cestu pro velké množství filtrace vody, kdy se získá čistá a bezpečná voda. Kromě toho, že jsou nano-vlákenné membrány používány v běžných filtračních systémech, jsou také využívány v biosystémech, v oblasti životního prostředí

pro čištění odpadních vod a v aplikaci úpravy vod. Vzhledem k jejich snadnému ovládní a vyšší účinnosti budou tyto membrány hrát důležitou roli v budoucnosti v nahrazení konvenčních membrán [24].

Skleněná vlákna se již nějakou dobu vyrábějí v sub-mikronovém rozsahu. Ve studii Graham a kol. s názvem Polymerní nano-vlákna použitá pro aplikace ve vzduchové filtraci se diskutuje o procesu výroby nano-vláken, o jejich výhodách a omezeních. Zmíněny jsou konstrukce a efektivita filtrů z nano-vláken. Zejména nano-vlákna poskytující výrazné zvýšení účinnosti filtrace při malém snížení propustnosti vzduchu nebo kapaliny. Při mnoha laboratorních testech, kdy byly simulovány skutečné provozní podmínky prostředí, prokázaly nano-vláknenné filtry vyšší životnost filtru a vyšší kapacitu uchycení kontaminujících částic. Nano-vláknenná filtrační média rozšířila úroveň filtrační účinnosti v několika různých aplikacích s velkou škálou prostředí.

V následujícím grafu 1 jsou zachyceny výsledky zatěžovacích zkoušek pro kabinové filtry použité v dolech. V grafu jsou porovnány dva filtry. Modrá linie je pro filtr z celulózy a červená pro filtr celulóza/nano-vlákna.



Graf 1: Výsledky testovaných filtrů – celulóza, celulóza/nano-vlákna

V grafu 1 je vidět patrný rozdíl v použitém materiálu. Kdy filtr ze směsi celulóza a nano-vlákna má významně menší tlakový spád než filtr čistě z celulózy. Což značí, že filtr ze

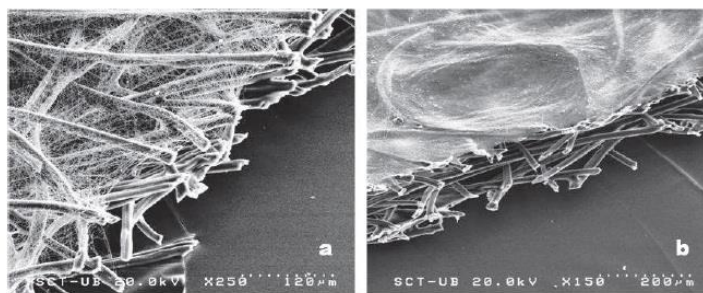
směsi celulóza/nano-vlákna se při zachycení stejného množství částic jako u filtru z celulózy nemusí vyměnit za nový.

Například při hodnotě 200g zachycených částic, lze v grafu vidět, že u filtru z celulózy významně vzrostl tlakový spád, tzn., že se filtr rychleji zanesl a rychleji se ucpal, než filtr, kde byla použita nano-vlákna. Ve studii bylo prokázáno, že nano-vlákna zvyšují životnost filtrů a také zvyšují jeho účinnost pro použití v důlních vozíkách [25].

V další studii R.S. Barhate a kol. popisují vliv parametrů elektrostatického zvlákňování na vlastnosti nano-vlákněné membrány. Parametry elektrostatického procesu, jako jsou například elektrické pole, počet otáček kolektoru, vzdálenost zvlákňovací trysky a další, mají vliv na morfologii vytvořených vláken. Na druhé straně mají parametry elektrostatického zvlákňování vliv na strukturální a transportní vlastnosti nano-vlákněné membrány. Autoři této studie zkoumali strukturální a transportní vlastnosti membrány ve vztahu k parametrům procesu výroby a cílem bylo pochopit ukládání a orientaci vláken v nano-vlákněném filtru. Výsledky ukázaly, že velikost pórů lze korigovat pomocí poměru tažení a ukládání vláken na kolektor. Bylo zjištěno, že uložení vlákna a velikost pórů mohou být optimalizovány k dosažení lepší struktury (velikost pórů, propojení pórů, pórovitost) a propustnosti filtračního média. Vzdálenost od zvlákňovacího hrotu ke kolektoru je další parametr, který může změnit ukládání a shromažďování nano-vláken. Akumulace elektrického náboje, která působí na nano-vlákna, je jedním z faktorů, který zhoršuje převážně optimalizaci struktury a transportní vlastnosti filtračního média [26].

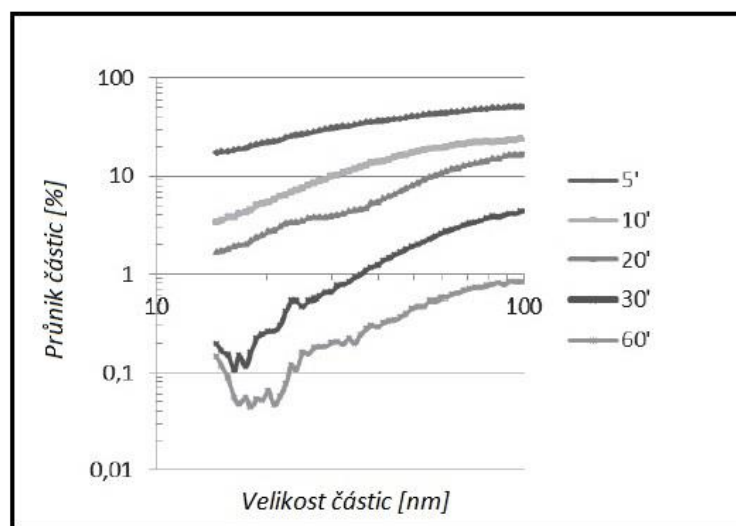
V článku nano-vlákněný filtr jako nový bariérní systém pro filtraci nano-částic Facciny M. a kol. popisují poslední pokrok ve vývoji výkonných bariérových systémů oproti materiálům z mikro- a nano-částic. Nano-vlákněné polyamidové 6 (PA 6) podložky byly vyrobeny elektrostatickým zvlákňováním na netkaný substrát z viskózy. Byly zkoumány vlivy elektrostatických parametrů včetně koncentrace roztoku, viskozity a vodivosti roztoku z hlediska výroby netkaných textilií s různou velikostí průměru vláken v rozmezí od 74 do 261 nm. Obměňováním několika procesních parametrů byly získány membrány s různou tloušťkou nano-vlákněných vrstev a z toho vyplívajícím rozdílným tlakovým spádem a filtrační efektivitou.

Testováno bylo pět filtrů. Každá nano-vláknenná vrstva vytvořená na filtru, byla zvlákněna po různou dobu (5, 10, 20, 30, 60 minut). Změnou času zvláknování, po který byl roztok zvláknován, na netkaný substrát byly vytvořeny vrstvy nano-vláken o různých tloušťkách. Od tohoto parametru se odvíjí velikost pórů, propustnost a účinnost filtru. S kratší dobou zvláknování je na obr. 16 vidět malé pokrytí substrátu a větší velikost pórů. Při zvláknování po delší čas jsou tyto faktory téměř nezjistitelné.



Obr. 16: SEM obrázky substrátů s membránou PA 6 elektrostaticky zvlákněných s různým časem: (a) 10minut, (b) 60minut. [27].

Na následujícím grafu 2 je zaznamenané měření pronikání nano-částic o velikosti v rozsahu 10 – 100 nm. Výsledky ukázaly, že pronikání nano-částic skrz nano-vláknenný filtr klesá při snižování velikosti nano-částic, v důsledku Brownova pohybu. Graf 2 dále ukazuje, že průnik částic je závislý na tloušťce filtru, která úměrně roste se zvyšováním časem zvláknování.



Graf 2: Průnik nano-částic skrz filtr s nano-vláknennou membránou z PA 6, s rychlostí proudícího vzduchu 1,7 cm/s. [27].

Z grafu lze například vyčíst, že částice o velikosti 50 nm a méně zachytí (nepropustí žádné částice) filtry, na které byla nano-vláknenná membrána zvlákňována 30 a 60 minut. Což jsou z pěti testovaných filtrů ty nejtlustší.

Je zřejmé, že zvlákňováním roztoku po různou dobu se vytvoří filtry s rozdílnou tloušťkou nano-vláknenné vrstvy, jejich účinnost – pronikání nano-částic byla hodnocena s rychlostí procházejícího vzduchu 1,7 cm/s. Tyto výsledky ukázaly možnost použití elektrostatického zvlákňování pro výrobu filtračních médií a prostředků na osobní ochranu, jako jsou ochranné roušky [27].

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V první fázi experimentu byl připraven polymerní roztok ze směsi CH/PEO. V další fázi bylo nutné otestovat chování tohoto polymerního roztoku při elektrostatickém zvlákňování a jeho optimální dávkování během zvlákňování z důvodu vyrobení nano-vlákenných vrstev o různé plošné hmotnosti.

Dalším bodem experimentu bylo elektrostaticky zvláknit biodegradabilní nano-vlákennou membránu CH/PEO na dva různé substráty. Roztok CH/PEO byl zvlákněn nejdříve na netkanou textilií spun-bond a poté na předem připravený biodegradabilní melt-blown. Byly vytvořeny dva typy filtrů s různými plošnými hmotnostmi nano-vlákenné membrány. Dalším krokem bylo otestovat filtrační efektivitu spolu s tlakovým spádem těchto vyrobených filtrů.

Na závěr experimentu byla otestována jejich biodegradabilita.

2.1. Použité chemikálie

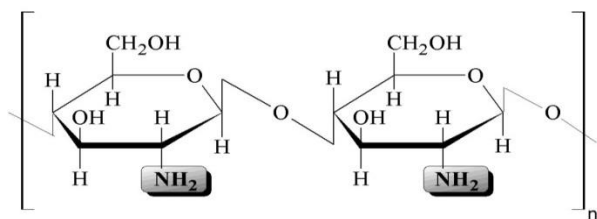
V této kapitole budou stručně popsány chemikálie použité v experimentu. Přiblíženy budou polymery sloužící pro samotnou výrobu filtru a rozpouštědla nutná pro rozpouštění těchto polymerů.

Chitosan

Je získáván deacetylací chitinu, který se nachází ve schránkách korýšů dále ve skořápkách a kostrách měkkýšů, v buněčných stěnách některých hub a kvasinek. Chitin se řadí mezi polysacharidy.

Chitosan, dostupný jako bílý prášek, je rozpustný v řadě kyselin a nerozpustný ve vodě. Je to biokompatibilní, biodegradabilní, antibakteriální a ekologicky přijatelný polyelektrolyt, který lze použít v mnoha aplikacích (kosmetika, medicína, fotografování, potravinářství, atd.) [28].

Sumární vzorec chitosanu je $(C_6H_{11}NO_4)_n$ a jeho chemický vzorec je uveden na obr. 17.

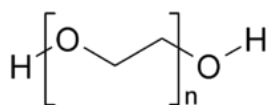


Obr.17: Chemický vzorec chitosanu

V experimentu byl použit chitosan 5 (nízkomolekulární) od firmy WAKO se stupněm deacetylace minimálně 80 % a viskozitou roztoku 5 g/l, při 20 °C přibližně 10 mPa.s.

Polyethylenoxid

Pro výrobu směsi CH/PEO byl použit PEO od firmy Aldrich s molekulovou hmotností 9×10^5 g/mol. Viskozita 5% roztoku PEO rozpuštěného ve vodě při teplotě 25 °C dosahuje 8,800-17,600 mPa.s., teplota tání je 65 °C a udávaná hustota 1210 kg/m³. PEO je rozpustný ve vodě, methanolu, DMF, není toxický pro vodní živočichy ani pro lidský organismus. Jeho chemický vzorec je znázorněn na obr. 18.



Obr.18: Chemický vzorec PEO [29].

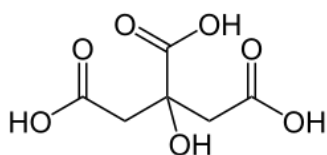
Biodegradabilní polymer typu polyethyltereftalát/kyselina mléčná

Na VŠCHT se zabývali využitím odpadního materiálu polyethylentereftalátu, který slouží jako surovina pro výrobu PET lahví. Každoročně se z něj vyrobí miliony plastových lahví, které skončí na skládkách nebo ve spalovnách a tvoří zátěž pro životní prostředí. Cílem jejich práce bylo spojit polyethylentereftalát a kyselinu mléčnou a otestovat biodegradabilitu takového typu kopolymeru. Na VŠCHT byla nejprve provedena acidolýza prané drtě z nápojových PET lahví za pomoci vodného roztoku kyseliny mléčné. Následující polykondenzací byl vyroben biodegradabilní materiál – kopolyester ethylentereftalát a kyselina mléčná (PET/LA). Ve spolupráci s TUL byla následně testována možnost zvláknění tohoto biodegradabilního kopolymeru metodou melt-blown [30].

Dále bude stručně popsáno použité rozpouštědlo pro přípravu chitosanového polymerního roztoku a další aditiva potřebná pro zlepšení průběhu elektrostatického zvlákňování polymerní směsi CH/PEO.

Kyselina citrónová

Nachází se převážně v citrusových plodech, ale i v dalších druzích ovoce a zeleniny. Je to krystalická, bílá pevná látka, netoxická. V experimentu byla použita kyselina citrónová od firmy Lachema o koncentraci 10 % pro rozpouštění chitosanu. Udávaná molekulová hmotnost kyseliny je 192,13 g/mol a hustota 1 665 kg/m³. Kyselina citronová je velmi dobře rozpustná ve vodě (133 g/100 ml při 20 °C) a také se dobře rozpouští v ethanolu [31].

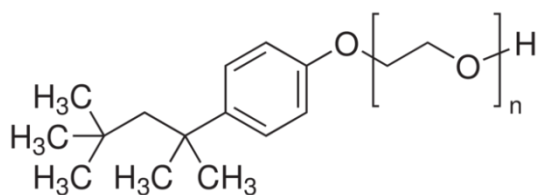


Obr. 19: Chemický vzorec kyseliny citrónové [31].

Triton X-100

Triton X-100 od firmy Acros organics byl v experimentu použit pro úpravu vlastností roztoku chitosanu, zejména pro snížení povrchového napětí, které hraje při elektrostatickém zvlákňování velmi důležitou roli. Obecně platí, že nižší povrchové napětí polymerního roztoku má pozitivní efekt na jeho elektrostatické zvlákňování.

Molekulová hmotnost Tritonu X-100 je 646.85 g/mol. Jedná se o bezbarvou kapalinu s hustotou 1070 kg/m³. Triton X-100 lze zařadit mezi neionogenní, povrchově aktivní látky se strukturním vzorcem znázorněným na obr. 20. Je dráždivý pro oči a škodlivý při požití [32].



Obr. 20: Chemický vzorec Tritonu X-100, $n=10$ [33].

Chlorid sodný

Byl použit chlorid sodný od firmy Lachema. Udávaná hustota je $2\,163\text{ kg/m}^3$. Rozpuštěním 35,86 g chloridu sodného ve 100 ml destilované vody při $20\text{ }^\circ\text{C}$ vzniká nasycený roztok. Nasycený roztok o objemu 4 ml byl přidán do 50ml roztoku PEO pro zvýšení výsledné elektrické vodivosti, která hraje také jednu z důležitých rolí při elektrostatickém zvlákňování. Opět platí, s rostoucí elektrickou vodivostí polymerního roztoku probíhá elektrostatické zvlákňování intenzivněji.

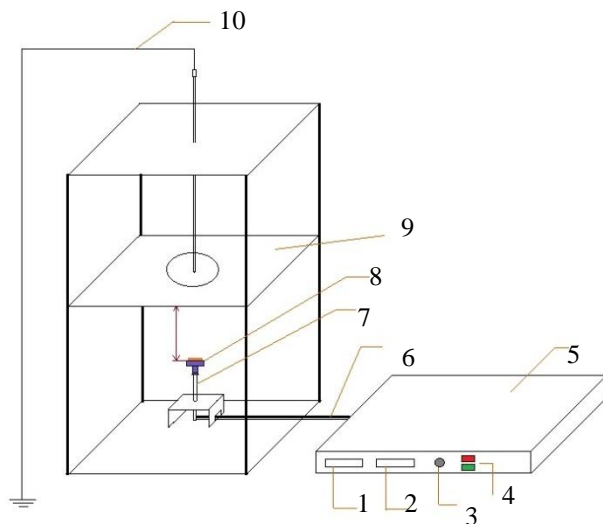
2.2. Použitá zařízení pro výrobu testovaných filtrů

V následující kapitole budou představena zařízení, která byla použita k výrobě nano-vlákenné membrány a finálních filtrů. Jelikož samotná nano-vlákenná membrána nemá dostatečné mechanické vlastnosti, bylo nutné ji spojit s podkladovou vrstvou, která zlepšila tyto vlastnosti. Byly testovány dva druhy podkladových materiálů a to spun-bond a melt-blown. V případě spun-bondového podkladu byl substrát pořízen od firmy PEGAS. V případě filtru typu melt-blown byl podkladový materiál vyroben přímo na TUL, v prostorách poloprovozu Netkaných textilií.

Zařízení pro elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování bylo realizováno na zařízení, které se nachází v laboratoři Technické univerzity v Liberci. Toto zařízení nabízí možnosti navolit si některé parametry zvlákňování jako, vzdálenost elektrody od sběrného kolektoru a velikost použitého vysokého napětí. Pro tento experiment byla použita vzdálenost elektrody od sběrného kolektoru 10 cm. Elektrické napětí bylo nastaveno na 50 kV, vše probíhalo při laboratorní teplotě $21\text{ }^\circ\text{C}$ a vlhkosti 60 %. Pro zvlákňování byl použit nastavný hrot, jehož výhodou je vyšší intenzita elektrostatického zvlákňování a tvorba větší plochy nano-vlákenné vrstvy na podkladovém materiálu. Výhodou nastavného hrotu je větší plocha elektrody, na kterou je možné nadávkovat větší množství polymerního roztoku. Zvlákňování probíhalo po různou dobu, přibližně 20, 40 a 120 s. Důvodem bylo vyrobení nano-vlákenných vrstev s různou plošnou hmotností, a to 1, 3 a 5 g/m^2 . Parametry elektrostatického zvlákňování

(vzdálenost a vysoké napětí) byly nastaveny na základě mnoha předešlých experimentů a vyhodnoceny jako neoptimálnější. Jako podkladový materiál byl zvolen spun-bond a melt-blown, jak je uvedeno výše.

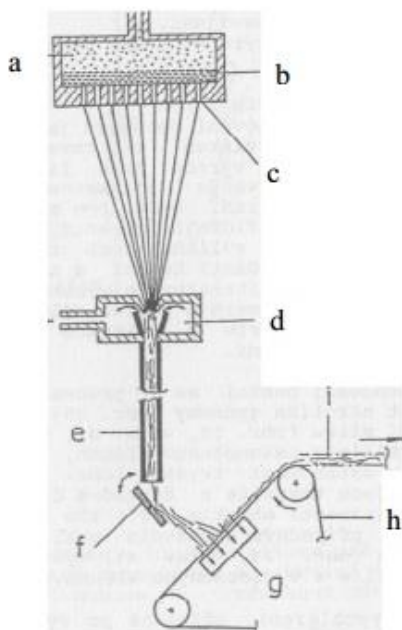


Obr. 21: Schéma laboratorního elektrostatického zvlákňování:

1-zobrazení hodnoty proudu, 2-zobrazení nastaveného napětí, 3-ovládání pro regulaci napětí, 4- vypnutí a zapnutí zdroje vysokého napětí, 5-zdroj vysokého napětí, 6-řívod vysokého napětí ke zvlákňovací tyčce, 7-zvlákňovací tyčka, 8-nástavec nasazený na tyčce s nadávkovaným roztokem polymeru, 9-sběrný kolektor, 10-uzemnění kolektoru.

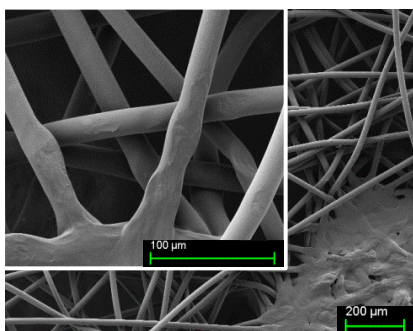
Technologie spun-bond

Netkaná textilie se vyrábí přímo z polymeru. Surovinou je polymer ve formě granulí, nejčastěji PE nebo PP. Zařízení se skládá z několika zvlákňovacích trysek, přes které prochází polymer a následně se ukládá na dopravník ve formě filamentů (nekonečná vlákna). Průměry vláken se pohybují v hodnotách 15-35 μm . Hotové rouno se zpevňuje termicky, chemicky nebo mechanicky- vpichováním [34]. Tento substrát doplněný o nano-vlákennou membránu bude v experimentální části nazýván *nano-filtr typu spun-bond*.



Obr. 22: Technologie spun-bond schéma výroby vláknenné vrstvy pod tryskou [35].

a) tavenina polymeru, b) filtrační sítko, c) tryska zvláknovací hubice, d) odtahová vzduchová tryska, e) šachta, f) výkyvná rozmítací destička, g) odsávání pod sítovým dopravníkem, h) sítový dopravník, i) vyrobená vláknenná vrstva



Obr. 23: SEM snímky netkané textilie spun-bond.

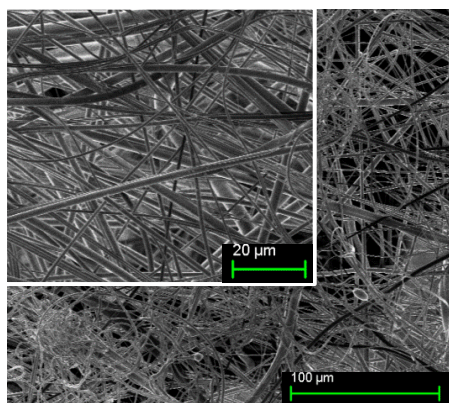
Technologie melt-blown

Tato metoda je velice rozšířená a slouží především k výrobě mikrovláken o průměru 2 - 7 μm. Výroba je průmyslová. Postupem této technologie je, že polymer ve formě taveniny je přiváděn do trysky, která je opatřena mnoha otvory. K otvorům je přiváděn ohřátý a stlačený vzduch. Následuje vytlačení taveniny skrze otvory. Tavenina je pomocí vzduchu zachycena, dále je unášena a pak dlužena. Vzniklá vlákna a jejich vlastnosti jsou ovlivněny mnoha faktory. Především jsou ovlivněna typem zařízení a jeho konstrukcí – tvarem a rozmístěním trysek. Dále polymerní taveninou – teplota tání, index toku a parametry proudícího vzduchu – charakter proudění [36].



Obr. 24: Zařízení melt-blown na TUL

Výslednou melt-blownovou vrstvu, zcela biodegradabilní, bylo možné použít jako podkladový substrát pro nano-novláknennou membránu a následně takovýto typ kompozitu využít pro filtrační aplikace. Tento substrát doplněný o nano-vláknennou membránu bude v experimentální části nazýván *nano-filtr typu melt-blown*.



Obr. 25: SEM snímky netkané textilie melt-blown.

2.3. Použité testovací metody

Zařízení pro testování filtrační efektivity

Pro testování filtračních vlastností jako je filtrační účinnost a tlakový spád, bylo použito zařízení MFP 1000 HEPA od firmy Palas. Model typu welas® digital 1000.

MFP filtrační zkušební zařízení je sestaveno pro testování plochých filtrů a malých filtračních vložek. Pomocí přístroje se stanoví koncentrace aerosolu a velikost částic, které filtrem procházejí. Tyto údaje poslouží k určení jednoznačné filtrační účinnosti, tlakového

spádu a rozsah MPPS filtrů HEPA. Zařízení je po nastavení individuálních podmínek plně automatizované, což zaručí spolehlivé výsledky měření.

Technické parametry přístroje:

- Objemový průtok: $0.54 - 16 \text{ m}^3 / \text{h}$
- Rychlost přiváděného vzduchu lze nastavit od 1,5 do 40 cm/s
- Měření tlakového spádu od 0 do 2500 Pa
- Zkušební povrch filtru: 100 cm^2
- Typy aerosolů: soli, částice NaCl, KCl, kapalně aerosoly, částice DEHS
- Rozsah měření částic se liší dle typu zařízení, pro welas digital 1000: 120 – 2000 nm, 200 – 9000 nm, 0,25 až 17 μm , 0,6 – 40 μm
- Ředění aerosolu vzduchem ve faktorech: 10, 100, 1,000, 10,000 [37]

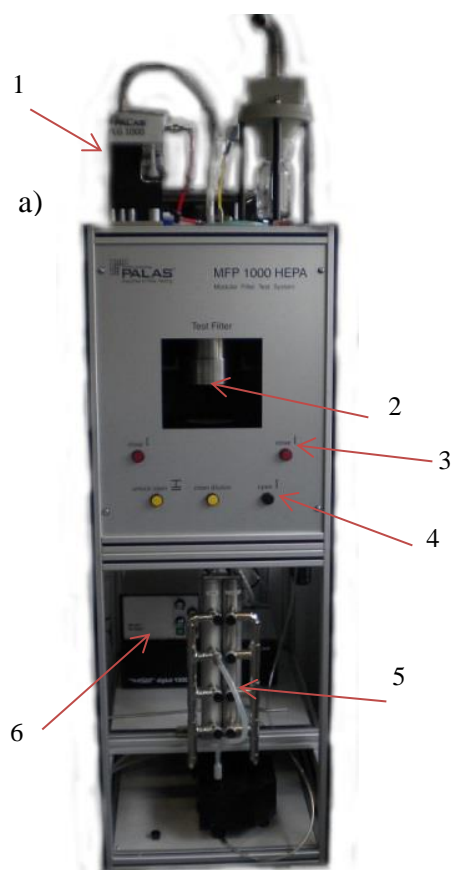


Obr. 26: Přístroj pro testování filtrační efektivity MFP 1000 HEPA od firmy Pala [37].

a) Zařízení HEPA:

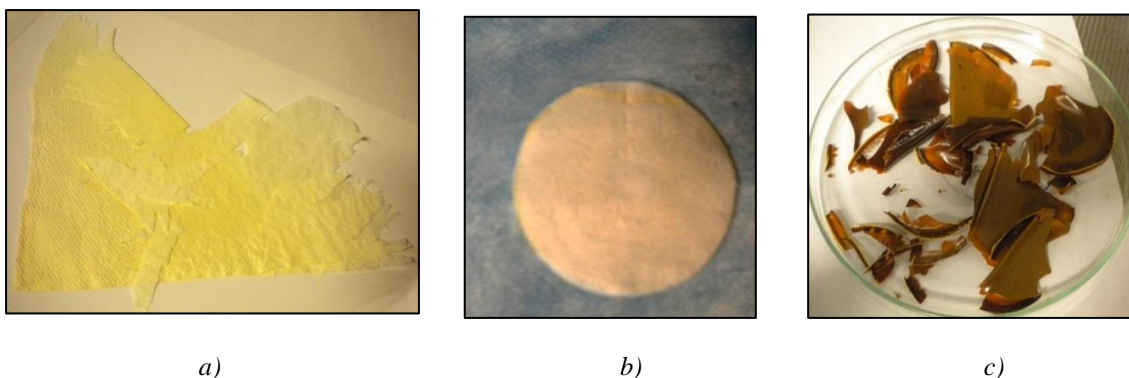
1- Nádobka s aerosolem; 2- Pneumatický držák filtru; 3- Tlačítka pro přitlačení pneumatického držáku na filtr; 4- Tlačítka pro zvednutí pneumatického držáku; 5- Pohyblivé ředění částic vzduchem. Tato část přístroje umožňuje definovat ředění uvolněného testovacího aerosolu a to v těchto faktorech: 10, 100, 1000 a 10 000; 6- Spektrometr Welas pomocí rozptýleného světla vyhodnocuje data-účinnost separace částic, rozsah MPPS [37].

b) Zvětšený pohled na nádobku s aerosolem a s tryskou



Testování biodegradability filtračního materiálu – Kompostovací test v laboratorních podmínkách

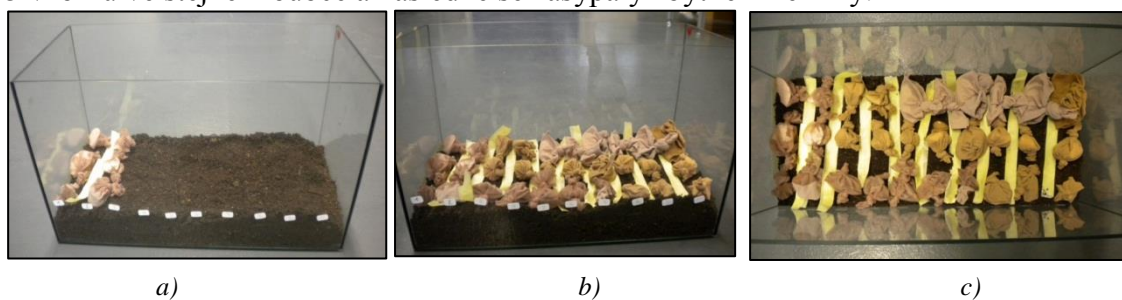
Vzorky pro testování biodegradability směsi polymeru CH/PEO byly vytvořeny ve třech formách. Testovala se samotná nano-vlákenná membrána. Dále byly testovány nano-filtry typu melt-blown a poslední typ vzorku byla fólie, která se vytvořila odlitím roztoku do Petriho misky a následným vysušením spolu se zesíťováním vznikla finální fólie.



Obr. 27: Vzorky pro testování biodegradability ve třech formách: a) Nano-vlákenná membrána; b) filtr typu melt-blown s nano-vlákennou membránou o plošné hmotnosti 3 g/m^2 ; c) fólie z polymerního roztoku

Každý typ vzorku byl rozdělen na 10 částí s přibližně stejnou hmotností. Každý vzorek byl následně zvážen a hmotnost se zaznamenala do tab. 7. Jednotlivé vzorky byly po zvážení vloženy do silonové punčochy a zavázány. Punčocha plnila tu funkci, kdy držela jednotlivé vzorky pohromadě a vzorek po vytažení nebyl obalen zeminou. Přitom však punčocha nijak nebránila procesu biodegradace ani jej neovlivňovala nebo jen minimálně. Vzorky byly řádně označeny, aby se po vytažení z kompostu daly jasně rozlišit. Celkem bylo k zahrabání do zeminy připraveno 15 vzorků.

Kompostovací test byl realizován v laboratoři. Akvárium o rozměrech 40x25x20 cm bylo naplněno kompostem asi do třetiny své výšky. Do akvária s kompostem se vložilo všech 15 vzorků ve stejné hloubce a následně se zasypaly zbytkem zeminy.



Obr. 28: Postup vkládání vzorků do zeminy. Snímky a) a b) zachytávají začátek vkládání vzorků do kompostu; snímek c) zobrazuje již všech 15 vzorků vložených do akvária s kompostem.

Přikrytí vzorků zbytkem kompostu bylo realizováno tak, aby byly všechny vzorky zahrabány ve stejné vrstvě.

Akvárium s kompostem a se vzorky bylo následně opatřeno vlhkoměrem a teploměrem. Po celou dobu testování bylo akvárium roseno vodou a to vždy 1x denně. Každý den se také zaznamenávaly hodnoty vlhkosti a teploty. Celé akvárium bylo zakryto netkanou textilií z důvodu udržování vlhkosti.

Na následujícím obr. 29 je zobrazeno akvárium po 1 týdnu testování.



Obr.29: Akvárium s kompostem a se vzorky po 1 týdnu testování

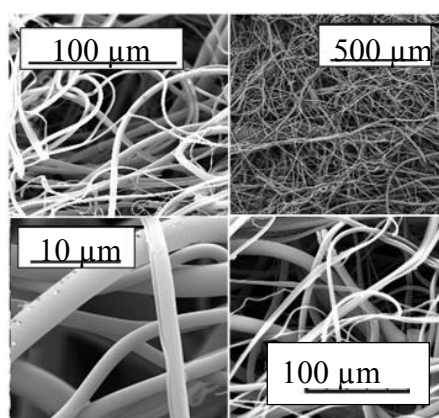
2.4. Zvlákňování podkladového materiálu PET/LA pomocí metody melt-blown

Na laboratorním přístroji melt-blown od společnosti J & M Laboratories byl kopolymer PET/LA testován, zda je zvlákňitelný. Důvodem je, že ne všechny polymery jsou touto metodou zvlákňitelné a vyžadují řadu specifických vlastností jako je nízká molekulová hmotnost a úzký distribuční pruh molekulových hmotností. V prvních sériích experimentu bylo zvlákňování biodegradabilního kopolymeru neúspěšné, z důvodu nehomogenosti taveniny. Tento nedostatek byl po mnoha provedených experimentech odstraněn správným nastavením teplot v extrudérech a zvlákňování proběhlo úspěšně. Byly nalezeny optimální podmínky zvlákňování viz tab. 2.

Teplota vzduchu	255°C
Teplota v extrudéru 1	80°C
Teplota v extrudéru 2	120°C
Teplota v extrudéru 3	150°C
Teplota trysky	215°C
Tlak vzduchu	2,5Bar
Průtok polymeru	0,022g/d/min
Počet děr	60

Tab. 2: Optimální podmínky zvlákňování

Snímky vyrobeného biodegradabilního melt-blownu PET/LA jsou zobrazeny na obr. 30.



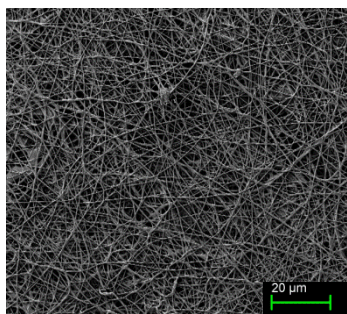
Obr. 30: SEM snímky melt-blownové vrstvy připravených z kopolymeru PET/LA

2.5. Příprava nano-vláknenné membrány CH/PEO pomocí elektrostatického zvlákňování

Roztok 8 %-ního chitosanu a 4 %-ní roztok PEO byly připraveny odděleně. Chitosan byl rozpuštěn v 10 % kyselině citrónové a PEO byl rozpustěn v destilované vodě. Oba roztoky byly míchány odděleně přes noc na elektromagnetickém míchadle. V následující operaci se do roztoku PEO přidal chlorid sodný v koncentraci 0,85 mol/l. Následně se roztok chitosanu a PEO smíchal tak, aby se získal roztok v hmotnostním poměru CH/PEO 8:2. Povrchové napětí roztoku CH/PEO bylo upraveno pomocí neionogenní povrchově aktivní látky Triton X-100 v koncentraci 3 % [38].

Roztok CH /PEO byl zvlákňován na netkanou textilii typu spun-bond tak, aby se vytvořila nano-vláknenná membrána ve třech různých plošných hmotnostech a to 1, 3 a 5 g/m². K získání různých plošných hmotností bylo zapotřebí zvlákňovat určité množství roztoku po

různou dobu. Po několika sériích zkušebního zvlákňování byly tyto parametry zjištěny. Pro vytvoření nano-vlákenné membrány v plošné hmotnosti 1 g/m^2 , byl roztok nadávkován v množství 0,7 ml a zvlákňován po dobu 20 – 25 sekund. K vytvoření plošné hmotnosti 3 g/m^2 se roztok nadávkoval v množství 1 ml a zvlákňován byl po dobu 70 – 80 sekund. Plošná hmotnost 5 g/m^2 byla vytvořena nadávkováním 1,2 ml roztoku a zvlákňováním po dobu 120 – 160 sekund.



Obr. 31: Nano-vlákenná membrána vytvořená pomocí elektrostatického zvlákňování z roztoku CH/PEO.

Nano-vlákenná membrána zvlákněná na netkanou textilii typu melt-blown, byla vytvořena pouze v jedné plošné hmotnosti a to 3 g/m^2 . Tato plošná hmotnost byla vybrána na základě výsledků získaných otestováním nano-filtrů typu spun-bond a na základě viditelného aspektu tloušťky melt-blownu. Netkané textilie typu melt-blown byla tlustší než netkaná textilie typu spun-bond. Předpokládalo se, že zvlákněním zvolené plošné hmotnosti nano-vlákenné membrány se získá přijatelný tlakový spád při žádoucí efektivitě.

Vzorky filtrů byly následně zesíťovány v horkovzdušné troubě při 130°C po dobu 1 hodiny. A následně byly filtry připraveny k testování filtrační efektivity a tlakového spádu.

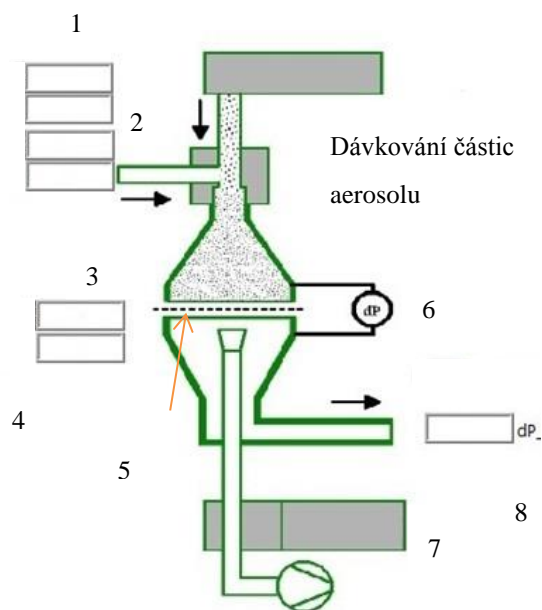
2.6. Testování filtračních vlastností zhotovených nano-filtrů pomocí zařízení MFP 1000 HEPA

Zařízení MFP 1000 HEPA je obsluhováno pomocí počítačových programů PDControl a FTControl. Obsluha musí vložit testovaný filtr do prostoru k tomu určenému a nastavit ředění částic aerosolu, pokud je to nutné. Po zjištění a nastavení optimálních podmínek je celý proces měření řízen automaticky počítačem.

Měření probíhalo ve dvou krocích. Nejprve se provedlo měření bez filtru, kdy se získala naměřená data počtu a velikosti částic před filtrem. V druhém kroku se vložil filtr do

měřicího zařízení a měření proběhlo s testovaným materiálem. V tomto kroku se získala data naměřená za filtrem. Testovaná plocha filtru byla 100 cm^2 a typ použitého aerosolu byl DEHS.

Z důvodu velké škály typů filtrů, které je možné na zařízení měřit, bylo nutné na počátku experimentu zjistit optimální podmínky testování tak, aby nedocházelo příliš rychle k ucpávání filtru velkým počtem nano-částic. Na druhou stranu, malý počet částic je také nežádoucí, neboť v tom případě dochází k chybě měření, kdy měřicí přístroj nedokáže detekovat počet a velikost částic, tzv. coincidental error. Z toho důvodu je nezbytné provést mnoho měření a zoptimalizovat tak měřicí proces pro konkrétní typ filtru (mikrovláknový, nano-vláknový, atd.). Nejdůležitější parametry měření z toho pohledu jsou: doba měření filtru, rychlost průtoku vzduchu, počet generovaných aerosolových nano-částic a jejich ředění. Po provedení několika sérií zkušebních testů, byly pro zhotovení experimentu stanoveny tyto optimální podmínky: doba měření před filtrem 30s, doba měření za filtrem: 60s, rychlost průtoku vzduchu: 5 cm/s, celkový průtok vzduchu 30 l/min, průtok vzduchu pro částice aerosolu 2,5 l/min, průtok vzduchu pro filtr 27,5 l/min.



Obr. 32: Popis principu měření na zařízení MFP 1000 HEPA:

1-Nastavené množství proudícího vzduchu pro dávkování částic aerosolu do přístroje v [l/min.]; 2-Skutečné množství proudícího vzduchu pro dávkování částic aerosolu do přístroje [l/min.]; 3-Nastavené množství proudícího vzduchu pro unášení částic aerosolu na filtr v [l/min.]; 4- Skutečné množství proudícího vzduchu pro unášení částic aerosolu na filtr v [l/min.]; 5- filtr; 6- Měření tlaku před/ za filtrem; 7- Zařízení pro měření velikosti částic; 8-Naměřený tlakový spád před/za filtrem

Zařízení MFP 1000 HEPA naměří a zpracuje tyto údaje:

Velikost částic naměřených před filtrem X_u [μm], velikost částic naměřených za filtrem X_o [μm], průměrné hodnoty velikosti částic X [μm], rozdíl velikosti naměřených částic před filtrem a za filtrem dX [μm], počet částic před filtrem dN_{up} [P/s], počet částic za filtrem dN_{down} [P/s], penetrace pro jednotlivé velikosti částic P [%], filtrační efektivita pro jednotlivé velikosti částic E [%], tlakový spád na začátku měření P_{start} [Pa], tlakový spád na konci měření P_{end} [Pa].

Výsledky filtračních efektivit a tlakových spádů nano-filtrů typu spun-bond

V následující tabulce jsou zaznamenány průměrné hodnoty filtrační efektivy ze tří testovaných filtrů. Nano-vláknenná membrána zvlákněná na spun-bond byla vytvořena v plošných hmotnostech 1, 3 a 5 g/m^2 . Kromě uvedených plošných hmotností byl testován i samotný spun-bond bez nano-vláknenné membrány (plošná hmotnost nano-vláken 0g/m^2).

Velikost částic X [μm]	PLOŠNÁ HMOTNOST NANO-VLÁKENNÉ MEMBRÁNY			
	0 g/m^2	1 g/m^2	3 g/m^2	5 g/m^2
	Filtrační efektivita E [%]	Filtrační efektivita E [%]	Filtrační efektivita E [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,12	10,25444	22,30631	72,854432	88,22308
0,129	10,55617	21,28227	71,635925	88,10895
0,138	9,530139	20,29788	71,444018	88,2411
0,149	9,322697	19,53932	70,951296	88,39103
0,16	9,765766	17,59196	70,120546	88,28906
0,172	9,33061	15,87832	70,361078	88,83644
0,184	8,55399	15,89982	71,241333	89,73283
0,198	9,301699	15,76096	72,399901	90,75576
0,213	9,40614	16,12375	73,600645	91,88296
0,229	9,603832	17,28765	74,751993	92,94218
0,246	10,52977	18,52323	76,112075	94,07813
0,264	9,759434	20,64311	77,438626	94,98781
0,284	10,38584	21,4678	78,440135	95,78887
0,305	10,14332	21,93014	79,700427	96,48141
0,328	10,76965	23,76824	80,526191	96,9804
0,352	9,655679	25,19443	81,174935	97,34402
0,379	8,536299	26,06104	81,770272	97,67824
0,407	7,245105	27,40452	82,322501	97,95501
0,437	5,95246	27,92559	83,248049	98,20616

0,47	7,609112	29,72199	84,180637	98,4061
0,505	6,567991	31,34464	85,367743	98,72247
0,543	6,626509	33,24482	86,726275	98,95444
0,583	5,883333	33,37432	87,450475	99,06509
0,627	8,123673	34,95755	88,290987	99,18661
0,674	6,332678	35,96461	89,21714	99,19206
0,724	5,488853	35,60285	89,536043	99,34798
0,778	6,682243	36,87194	89,82228	99,45212
0,836	6,759266	36,74797	90,359611	99,41316
0,898	6,538002	38,3098	91,164866	99,49019
0,965	5,7599	39,94561	90,842447	99,65267
1,037	9,222805	41,54556	91,549227	99,72316
1,115	8,208721	44,3923	92,219212	99,70002
1,198	6,180627	47,7616	92,768974	99,6551
1,287	6,450405	51,17369	92,78521	99,70908
1,383	8,433113	53,39857	93,027456	99,78144
1,486	10,80284	54,65815	92,751419	99,79301
1,597	17,20199	57,22919	93,813105	99,79301
1,717	14,06871	58,59413	94,52293	99,79301
1,845	17,18121	56,31884	95,31769	99,92789
1,982	14,41223	57,67311	96,069321	100
2,13	18,29669	49,31873	96,128906	100
2,289	19,5495	54,01658	97,154914	100
2,46	31,2338	58,74733	97,845201	100

Tab. 3: Průměrná filtrační efektivita zjištěná pro různé plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány

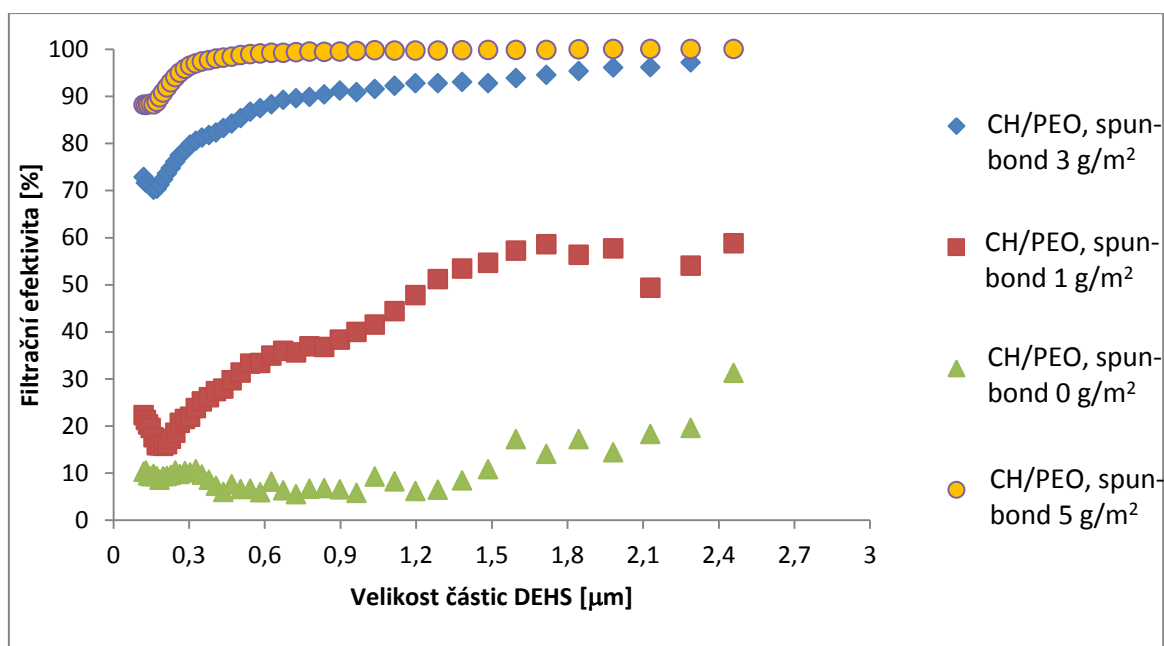
V tab. 4 jsou pro jednotlivé plošné hmotnosti uvedeny tyto údaje: tlakový spád na začátku a konci měření. Uvedené hodnoty jsou průměrné ze tří naměřených vzorků. Všechny dílčí údaje ke každému testovanému vzorku jsou uvedeny v Příloze 1.

Plošná hmotnost	0 g/m ²	1 g/m ²	3 g/m ²	5 g/m ²
Tlakový spád na začátku měření [Pa]	2,67	17	119	301,7
Tlakový spád na konci měření [Pa]	2,67	19,7	159	389,3

Tab. 4: Průměrný tlakový spád na začátku měření a na konci měření pro různé plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány

Diskuze výsledků

V následujícím grafu 4 jsou znázorněny plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány zvlákněné na netkanou textilii typu spun-bond. Na ose x je znázorněna velikost částic v mikrometrech a na ose y filtrační efektivita filtru v procentech pro danou velikost částic.



Graf. 4: Filtrační efektivita filtru tvořeného nano-vláknennou membránou v kombinaci se spun-bondem

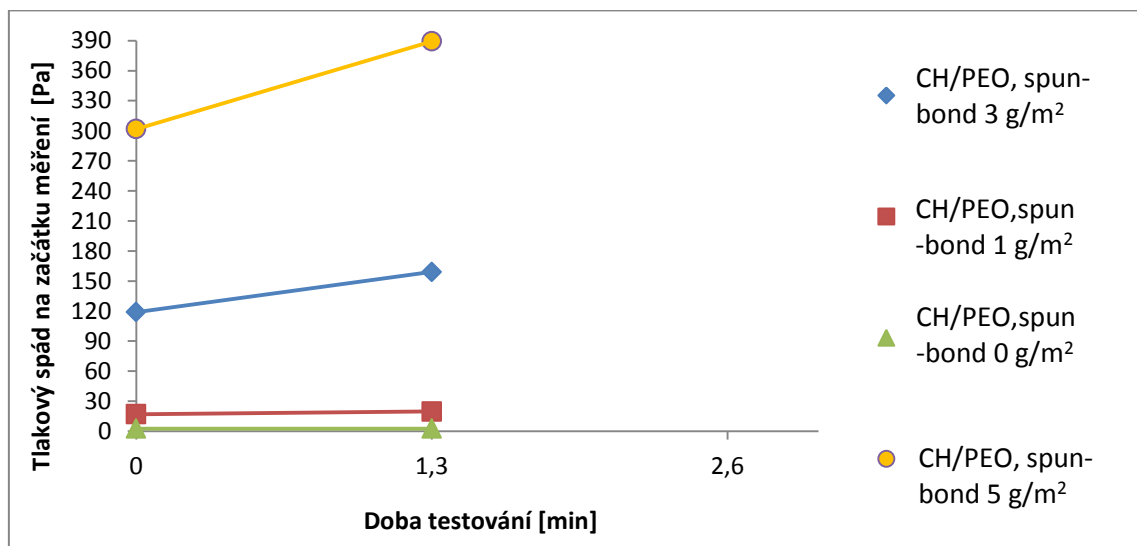
Z grafu 4 je na první pohled zřejmé, že čím je větší plošná hmotnost nano-vláknenné membrány, tím se zvyšuje filtrační efektivita, filtr je schopen zachytit více částic. Pro filtr tvořený nano-vláknennou membránou o plošné hmotnosti 5 g/m^2 byla zjištěna filtrační efektivita velikosti částic 500 nm přibližně $98,7 \%$. Pro filtr s nano-vláknennou membránou o plošné hmotnosti 3 g/m^2 dosahovala efektivita záchytu částic o velikosti 500 nm hodnoty $85,4 \%$. Z tohoto pohledu je možné tvrdit, že pouhým zvýšením plošné hmotnosti nano-vláknenné membrány z 3 na 5 g/m^2 je možné zvýšit efektivitu filtru o přibližně 13% .

Daleko vyšších zlepšení účinnosti filtru je možné zaznamenat u filtrů s nižší plošnou hmotností nano-vláknenné membrány. Jako příklad lze uvést filtr s nano-vláknennou membránou o plošné hmotnosti 1 g/m^2 , kde filtrační efektivita pro nano-částice o velikosti 500 nm dosahovala hodnoty $31,3 \%$. V porovnání s filtrem bez nano-vláknenné membrány, kde efektivita filtru pro nano-částice o velikosti 500 nm dosahovala pouhých $7,6 \%$. V tomto případě můžeme tvrdit, že pouhý 1 g/m^2 zlepšil filtrační efektivitu pro průchod nano-částic o velikosti 500 nm až o 24% .

Tato naměřená data jsou v dobré shodě s výsledky, které byly zjištěny ve studii o aplikaci nano-vláken ve vzduchových filtrech uvedené v kapitole 1.12. Tým vědců v tomto případě také dospěl k názoru, že s rostoucí plošnou hmotností nano-vláken roste i účinnost filtru. Je však třeba brát v úvahu optimální plošnou hmotnost nano-vláken. Neboť jak je patrné, tak

s rostoucí plošnou hmotností rozdíl mezi naměřenými efektivitami je méně znatelný. Tzn., že vysoké plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány nemají ve výsledné filtraci tak veliký přínos. Pokud bereme v úvahu cenu materiálu, pak je nutné se zamyslet nad poměrem cena a výkon.

V tab. 4, kde jsou zaznamenány tlakové spády na začátku měření a na konci měření, je možné vidět, že při zvyšování plošné hmotnosti roste i tlakový spád testovaných filtrů. Přičemž testování filtrů probíhalo vždy po dobu 90 sekund. Z toho 30 sekund probíhalo tzv. měření před filtrem, z něhož je získaný tlakový spád na začátku měření. Zbylých 60 sekund se filtry testovaly s použitím aerosolových částic a získal se tlakový spád na konci měření.



Graf 5: Růst tlakového spádu během měření. Celková koncentrace částic za 1 min. měření byla 1×10^8 č/m³.

Při dávkování stejné koncentrace částic je v grafu 5 jasně vidět, že filtr s vyšší plošnou hmotností se za 1 minutu měření zanesl rychleji, než filtry s nižší plošnou hmotností. U filtru s plošnou hmotností 0 g/m² nano-vlákněné membrány byl tlakový spád na začátku měření 2,67 Pa, na konci měření stejný. Z toho lze usuzovat, že spun-bond bez nano-vlákněné membrány zachytí jen minimum částic a proto se jeho tlakový spád na konci měření nezvýšil. Při plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány 1 g/m² byl počáteční tlakový spád zhruba o 14 Pa vyšší než u filtru bez nano-vlákněné membrány. Na konci měření tlakový spád u tohoto filtru vzrostl ze 17 na 19,7 Pa. Podle nepatrného zvýšení tlakového spádu, lze říci, že se filtr ze všech testovaných filtrů zanesl nejméně, tomu by měla odpovídat i jeho životnost, měla by být vyšší než u ostatních filtrů. Filtr by měl

částice MPPS o rozměrech 120 nm až 505 nm filtrovat s účinností pouze kolem 20 % jak ukazuje předchozí graf 5. Filtr tedy částice o nano-rozměrech MPPS zachytí s malou účinností, ale výměna za nový filtr bude nutná až za delší dobu. Je schopen dobře plnit svou funkci například v klimatizacích, které jsou určeny pro rodinné domy, kde zachytává částice o rozměrech stovek mikrometrů například saze, pyl a další. Filtr s plošnou hmotností 5 g/m^2 nano-vláknenné membrány, což je nejvyšší plošná hmotnost z testovaných filtrů, jehož tlakový spád na začátku měření byl 301,7 Pa a za 1 minutu měření extrémně vzrostl na 389,3 Pa je schopen zachytit MPPS částice o rozměrech 120 nm až 505 nm s 95% účinností. Z hodnoty tlakového spádu, která během experimentu narostla nejvíce ze všech, lze říci, že filtr je schopen filtrovat částice MPPS pouze po omezenou dobu, má krátkou životnost, a je nutné jej brzy vyměnit. Tyto údaje naznačují oblast využití takového filtru. Může být vhodný do nemocnic, kde je důležité odfiltrout částice o nano-rozměrech jako jsou bakterie a viry s tím, že filtr poslouží jen určitou dobu, například po dobu provedení operace. Důležité je vždy vědět, na co má být filtr použit a jaké má plnit funkce. Volba filtračního média a parametrů filtrace závisí na účelu použití.

Výsledky filtračních efektivit a tlakových spádů nano-filtrů typu melt-blown

Z předchozích měření bylo patrné, že plošná hmotnost ovlivňuje efektivitu filtru do jisté míry. Tzn., že při vysokých plošných hmotnostech nano-vláknenné membrány se filtrační efektivita zvyšuje už jen mírně. Z toho důvodu se v dalším experimentu zvolila pouze jedna plošná hmotnost nano-vláknenné membrány, a to 3 g/m^2 , která byla v předchozím měření zvolena jako optimální v porovnání tlakového spádu a filtrační efektivy filtru.

V následující tab. 5 jsou zaznamenány průměrné hodnoty filtrační efektivy pro nano-vláknennou membránu zvlákněnou na netkanou textilií typu melt-blown o plošné hmotnosti 3 g/m^2 .

PLOŠNÁ HMOTNOST NANO-VLÁKENNÉ MEMBRÁNY 3 g/m ²					
Velikost částic X [μm]	Filtrační efektivita E [%]	Velikost částic X [μm]	Filtrační efektivita E [%]	Velikost částic X [μm]	Filtrační efektivita E [%]
0,12	86,2293	3790,	94,2017	1,198	99,73331
0,129	85,75222	0,407	94,64189	1,287	99,80335
0,138	85,39304	0,437	95,09694	1,383	99,86301
0,149	85,44901	0,47	95,50226	1,486	99,87653
0,16	84,84166	0,505	96,14353	1,597	99,90996
0,172	85,14614	0,543	96,82867	1,717	99,95647
0,184	85,49561	0,583	97,42596	1,845	100
0,198	86,08778	0,627	97,79155	1,982	100
0,213	87,01839	0,674	98,14565	2,13	100
0,229	88,21039	0,724	98,43704	2,289	100
0,246	89,28306	0,778	98,76916	2,46	100

Tab. 5: Průměrná filtrační efektivita pro plošnou hmotnost 3 g/m²

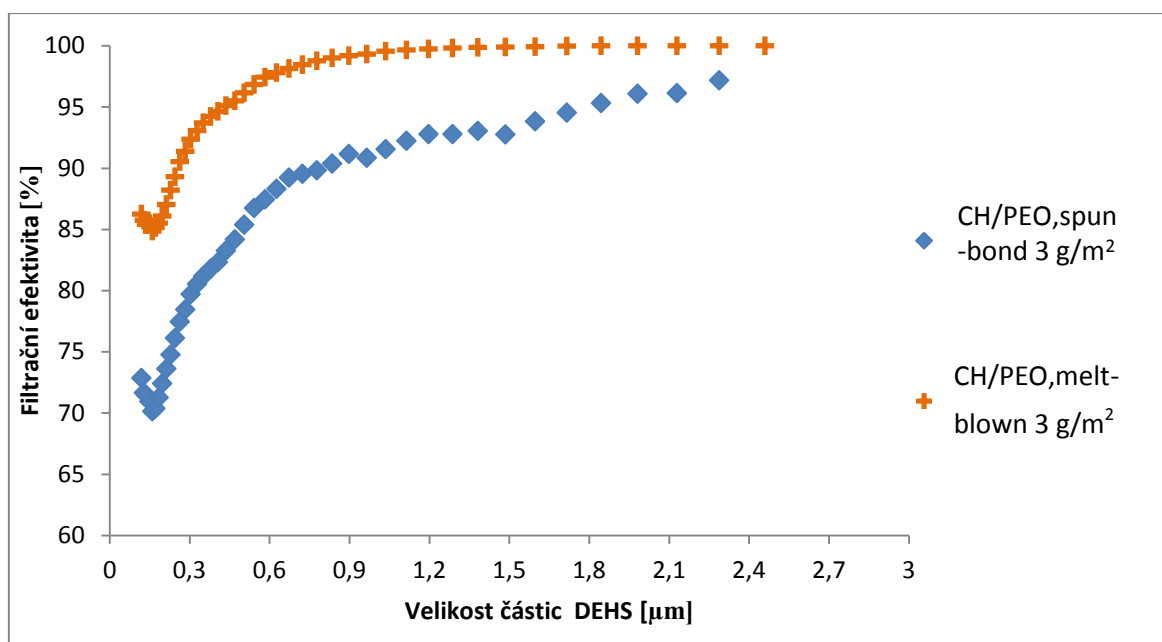
V tab. 6 jsou pro plošnou hmotnost 3 g/m² uvedeny tyto údaje: tlakový spád na začátku měření a na konci měření. Uvedené hodnoty jsou průměrné ze tří naměřených vzorků. Všechny dílčí údaje ke každému testovanému vzorku jsou uvedeny v Příloze 2.

Plošná hmotnost	3 g/m ²
Tlakový spád na začátku měření [Pa]	171
Tlakový spád na konci měření [Pa]	204

Tab. 6: Průměrný tlakový spád na začátku měření a na konci měření pro plošnou hmotnost 3 g/m².

Diskuze výsledků

V následujícím grafu 6 je zaznamenám nano-filtr typu spun-bond a nano-filtr typu melt-blown. Na obě netkané textilie byla zvlákněna nano-vlákenná membrána CH/PEO o plošné hmotnosti 3 g/m².



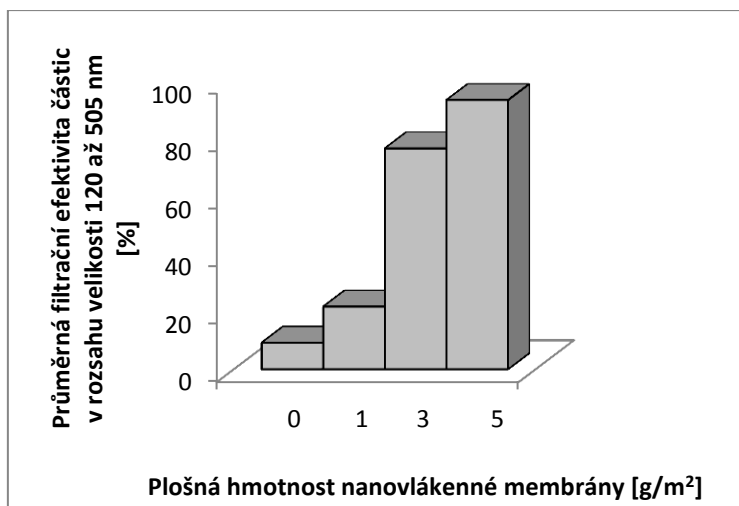
Graf 6: Porovnání filtrační účinnosti nano-filtru spun-bond a nano-filtru melt-blown při stejné plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány

V grafu 6 je vidět lepší filtrační účinnost nano-filtru s podkladovým substrátem melt-blown při stejné plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány jako u filtru typu spun-bond. Filtrační efektivita je vztažena na velikost částic. Účinnost filtrů lze nejlépe porovnat při jedné velikosti částic. Částice velikosti 407 nm zachytí filtr typu melt-blown cca s 95 % účinností, zatímco filtr typu spun-bond zachytí částice téže velikosti s účinností 82 %. Z tohoto pohledu je zřejmé, že i typ podkladového materiálu má veliký vliv na filtrační efektivitu výsledného filtru. V tomto případě lze tvrdit, že pouhá změna podkladového materiálu zlepšila efektivitu filtru o 13% pro nano-částice o velikosti 407nm. Zatímco tlakový spád na začátku měření byl v porovnání filtru vyrobeného ze spun-bondu nebo melt-blownu hodně podobný, a to 119 a 171 Pa.

2.7. Shrnutí výsledků testů filtrace

Vliv plošné hmotnosti na filtrační efektivitu nano-filtru typu spun-bond

Závislost filtrační efektivitu na plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány je znázorněna na následujícím grafu 7.



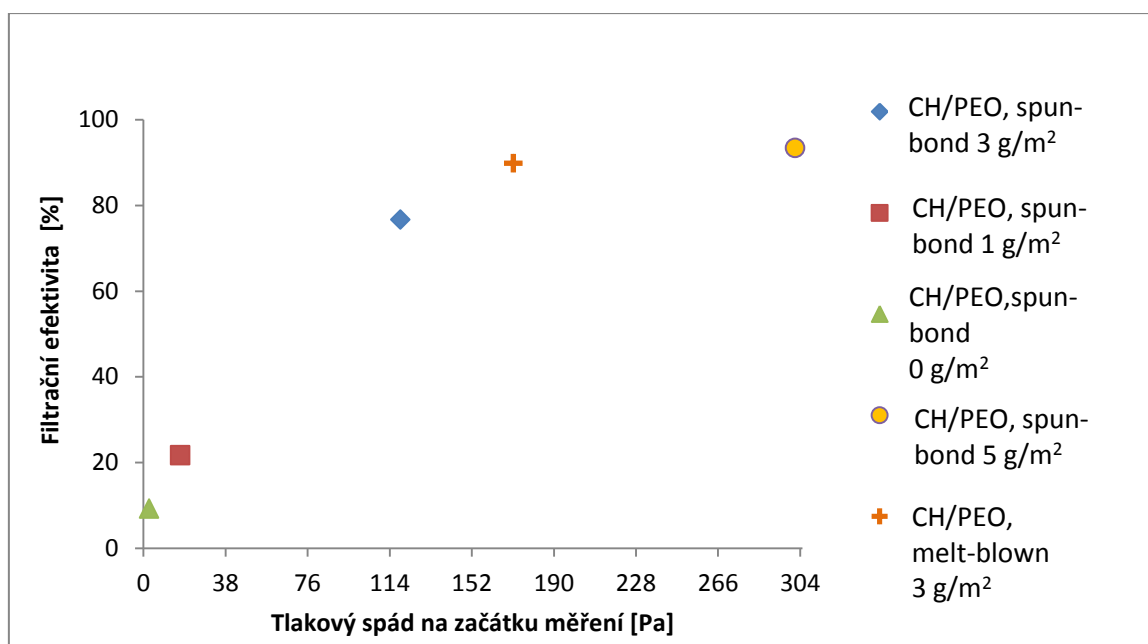
Graf 7: Filtrační efektivita v závislosti na plošnou hmotnost nano-vlákněné membrány

Graf 7 znázorňuje vliv plošné hmotnosti na filtrační efektivitu částic o velikosti 120 až 505 nm. Je zřejmé, že filtr s vyšší plošnou hmotností nano-vlákněné membrány zachytává více částic. Velký rozdíl ve filtrační účinnosti je u plošné hmotnosti 1 g/m² a 3 g/m². Přičemž filtrační účinnost u plošné hmotnosti 5 g/m² se tak významně neliší od hodnot naměřených u plošné hmotnosti 3 g/m².

Vliv plošné hmotnosti na tlakový spád nano-filtru typu spun-bond a melt-blown

Z předchozí tab. 4 je zřejmé, že s rostoucí plošnou hmotností nano-vlákněné membrány roste i tlakový spád filtru.

V následujícím grafu 8 je znázorněna průměrná efektivita pro záchyt částic velikosti v rozsahu 120 až 505 nm a tlakový spád na začátku měření filtrů o různých plošných hmotnostech nano-vlákněné membrány.



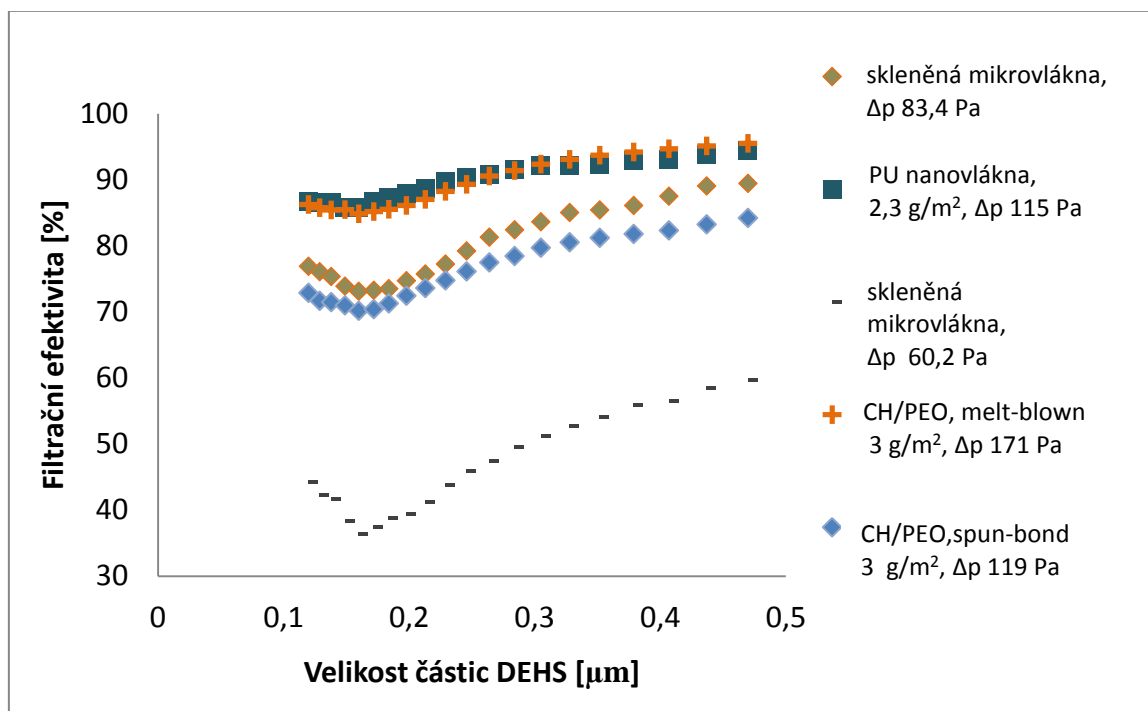
Graf 8: Průměrná filtrační efektivita a tlakový spád na začátku měření při zachycení částic v rozsahu velikostí 120 až 505 nm.

Žádoucí pro filtraci je použit filtr s co nejvyšší filtrační efektivitou při co nejnižším tlakovém spádu. V tom případě se očekává od grafu závislosti tlakového spádu na filtrační efektivitě, aby „ideální“ filtr byl umístěn co nejvíce v levém horním rohu. Body umístěné co nejvíce nahoře v grafu 8 označují filtr typu spun-bond s plošnou hmotností nano-vlákenné membrány 5 g/m² a filtr typu melt-blown s plošnou hmotností nano-vlákenné membrány 3 g/m². U prvního filtru se filtrační efektivita pohybuje nad 90 % a u druhého je filtrační efektivita těsně k 90 %. Tyto filtry jsou v grafu 8 umístěny nejvíce nahoře, což tedy značí vysoký zachyt částic. Na druhou stranu jsou zase ze všech testovaných filtrů umístěny nejvíce vpravo, to znamená vysoký počáteční tlakový spád. Bod, který reprezentuje filtr typu spun-bond s plošnou hmotností 3 g/m², je umístěn více vlevo, což udává lepší tedy nižší tlakový spád, ale není umístěn nejvýše, takže jeho filtrační efektivita nedosahuje tak vysokých hodnot. Zbylé dva body v grafu, které patří filtrům typu spun-bond s žádnou nano-vlákennou membránou a nejnižší plošnou hmotností nano-vlákenné membrány 1 g/m² jsou umístěny nejvíce vlevo, ze všech testovaných filtrů. Tudiž mají nejnižší počáteční tlakový spád, ale také jsou umístěny nejnižší na ose y, na které se zaznamenává filtrační efektivita.

Srovnání nano-filtrů s komerčními filtry z hlediska filtrační efektivity a tlakového spádu

Porovnány budou dva vytvořené filtry se třemi komerčními filtry. Filtry byly k sobě vybrány podle podobného tlakového spádu. Z vytvořených filtrů to bude nano-filtr s nano-vláknennou membránou CH/PEO o plošné hmotnosti 3 g/m^2 v kombinaci s melt-blownem a nano-filtr o plošné hmotnosti 3 g/m^2 nano-vláknenné membrány CH/PEO tentokrát v kombinaci se spun-bondem. Z komerčních filtrů byl zvolen nano-filtr s nano-vláknennou membránou z PU o plošné hmotnosti $2,3 \text{ g/m}^2$ v kombinaci se spun-bondem a dále dva filtry ze skleněných mikrovláken. Nano-filtry vytvořené v rámci této diplomové práce jsou odlišné od komerčních filtrů hlavně v tom, že jeden je celý z biodegradabilního materiálu a druhý je částečně biodegradabilní. Tuto vlastnost komerční filtry srovnávané v této diplomové práci nenabízejí.

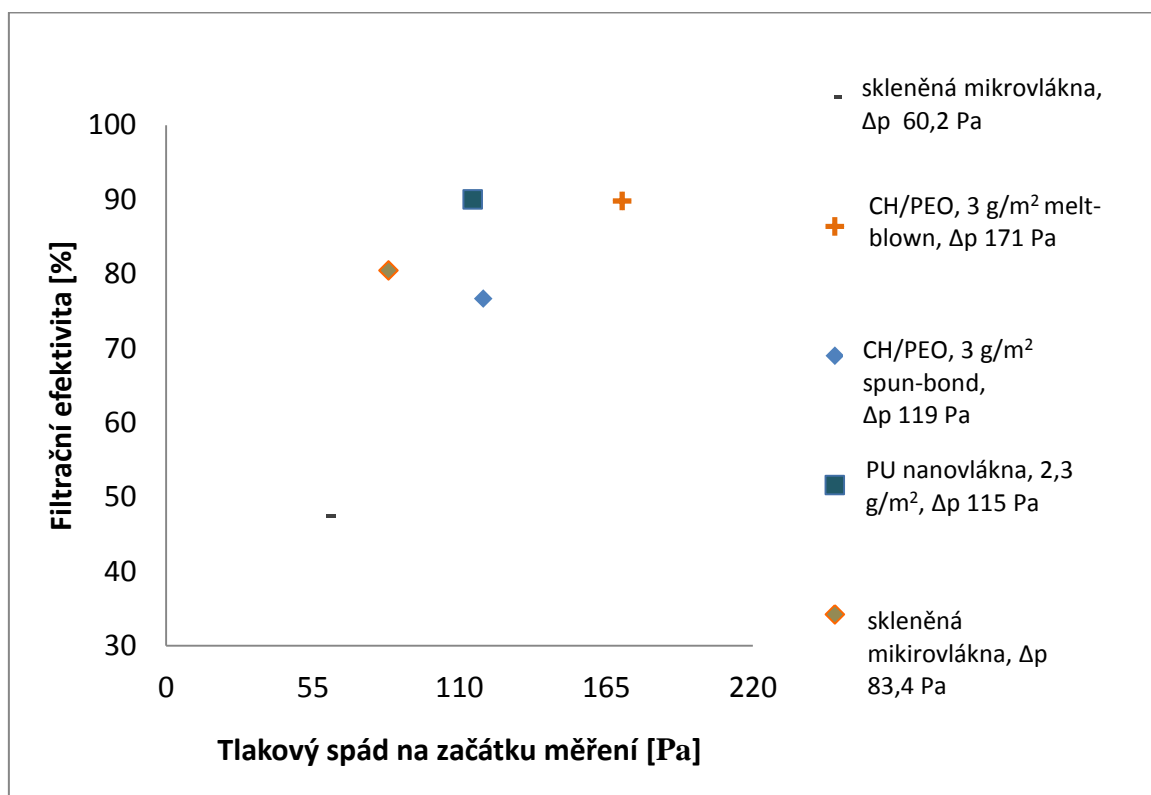
Hodnoty komerčních filtrů byly získány z předešlých studií testováním filtračních vlastností syntetických a skleněných filtrů na Ústavu pro nano-materiály, pokročilé technologie a inovace, Ing. Jakubem Hrůzou, PhD. Pro přehled je v následujícím grafu 9 nejprve uvedena filtrační efektivita vztažená na velikost částic a to jak pro vyrobené filtry v rámci diplomové práce, tak pro komerční filtry.



Graf 9: Srovnání vytvořených filtrů s komerčními filtry z hlediska filtrační efektivity vztažené na velikost částic DEHS

Pro lepší představu je výhodnější srovnávat filtrační efektivitu odpovídající jedné velikosti částic pro všechny filtry stejnou. V tomto případě byla zvolena velikost filtrovaných částic 407 nm. Zajímavé je porovnání filtru typu melt-blown s plošnou hmotností nano-vlákněné membrány 3 g/m² a filtru z PU nano-vláken v plošné hmotnosti 2,3 g/m². Z grafu 9 je vidět nepatrně vyšší filtrační efektivita u filtru typu melt-blown, lze říci, že je to způsobené vyšší plošnou hmotností nano-vlákněné membrány. Tato závislost byla potvrzena v kapitole Vliv plošné hmotnosti na filtrační efektivitu nano-filtru typu spun-bond. Filtr typu melt-blown o plošné hmotnosti 3 g/m² nano-vlákněné membrány, má nejen o necelé 2 % vyšší filtrační efektivitu zachytu částic velikosti 407 nm, ale je i vyroben z biodegradabilního materiálu na rozdíl od filtru z PU. Nejhorších výsledků dosahuje komerční filtr mikrovlákněný, jehož filtrační efektivita dosahuje hodnoty pouze 56 %. Velmi podobných výsledků filtračních efektivit pak dosahují komerční skleněný mikrovlákněný filtr a nano-filtr typu spun-bond s nano-vlákněnou vrstvou o plošné hmotnosti 3 g/m² a to 82 %.

V následujícím grafu 10 je zaznamenán tlakový spád vztažený na filtrační efektivitu při zachytu částic v rozmezí 102 až 505 nm.

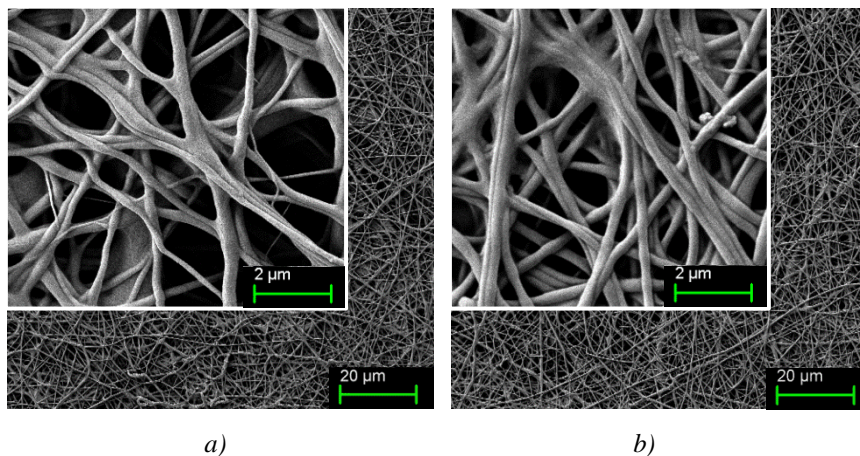


Graf 10: Filtrační efektivita při tlakovém spádu na začátku měření pro velikost částic v rozsahu 102 až 505 nm.

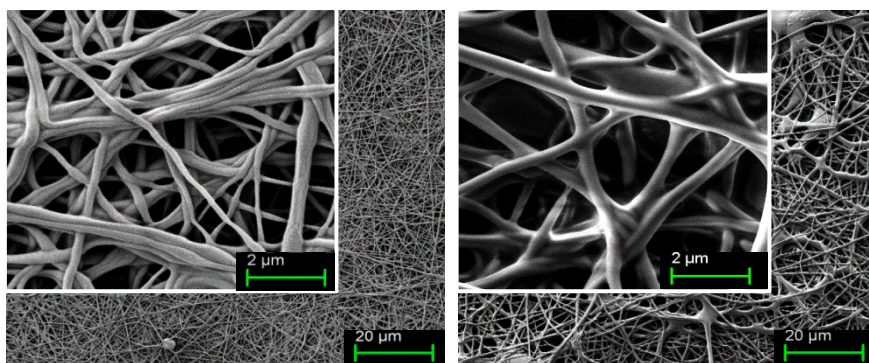
V grafu 10 je zachycen tlakový spád na začátku testování pro záchyt částic velikosti 102 až 505 nm. Lze říci, že tato velikost částic patří do MPPS. Filtr s nano-vláknennou membránou CH/PEO o plošné hmotnosti 3 g/m^2 v kombinaci s melt-blownem, má filtrační efektivitu při záchytu částic v rozmezí velikostí 102 až 505 nm 89,78% při tlakovém spádu 171 Pa. Filtrační efektivitu má shodnou s filtrem z PU nano-vlákien v plošné hmotnosti $2,3 \text{ g/m}^2$. Tlakový spád má filtr z PU nano-vlákien o plošné hmotnosti $2,3 \text{ g/m}^2$ o něco nižší, než filtr CH/PEO o plošné hmotnosti 3 g/m^2 v kombinaci s melt-blownem, což může být způsobeno nižší plošnou hmotností o $0,7 \text{ g/m}^2$, tato hodnota může hrát významnou roli v rozdílu filtračních efektivit. Z tohoto grafu nelze tvrdit, který filtr je lepší nebo horší, záleží na účelu použití a podle toho se zvolí parametry filtru. Z pohledu ekologického lze říci, že filtr CH/PEO v kombinaci s melt-blownem je lepší než PU filtr, protože je celý z biodegradabilního materiálu a lze jej ekologicky likvidovat.

Snímky SEM nano-filtrů před a po testování na zařízení HEPA

Z důvodu porovnání morfologie vláken před filtrací a po filtraci byly vyhotoveny snímky SEM, viz obr. 33.



Obr. 33: SEM snímky elektrostaticky zvlákněného roztoku CH/PEO na netkanou textilii melt-blown o plošné hmotnosti 3 g/m^2 : a) filtr před testováním, b) filtr po testování



a)

b)

Obr. 34: SEM snímky elektrostaticky zvlákněného roztoku CH/PEO na netkanou textilii spun-bond v plošné hmotnosti 5 g/m² a) filtr před testováním, b) filtr po testování

Na vzorcích po testování na zařízení HEPA nejsou na SEM vidět žádné usazené aerosolové částice DEHS, jak by se mohlo předpokládat. Důvod je takový, že DEHS se po delší době zcela odpaří, neboť, kapičky této kapaliny o průměru 0,3 μm mají životnost pouze 4 hodiny, jak dokazuje [39].

Na snímcích je však jednoznačně vidět, že nano-vláknenná membrána nebyla při testování filtrace na zařízení HEPA mechanicky poškozena vlivem rychle proudícího vzduchu, nano-vlákna vlivem proudícího aerosolu nenabotnala ani se nijak nedeformovala. Tímto experimentem bylo ověřeno, že nano-vláknenná vrstva ze směsi CH/PEO je dostatečně odolná nejen mechanicky vůči proudícímu vzduchu, ale také dostatečně chemicky inertní vůči drobným aerosolovým nano-částicím.

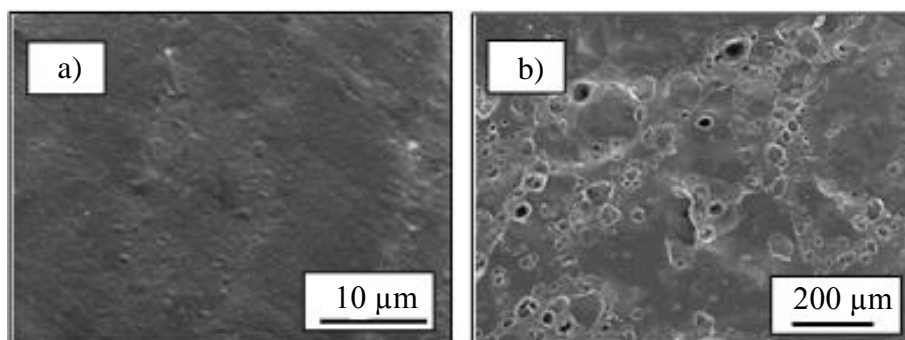
2.8. Testování biodegradabilních vlastností zhotovených nano-filtrů

Biodegradabilní test kopolymeru PET/LA

Test byl proveden na Mikrobiologickém ústavu AV ČR, Doc. RNDr. Čeněk Novotný, CSc. [30]. Polymer PET/LA byl testován ve dvou formách a to jako fólie a jako vláknenná vrstva.

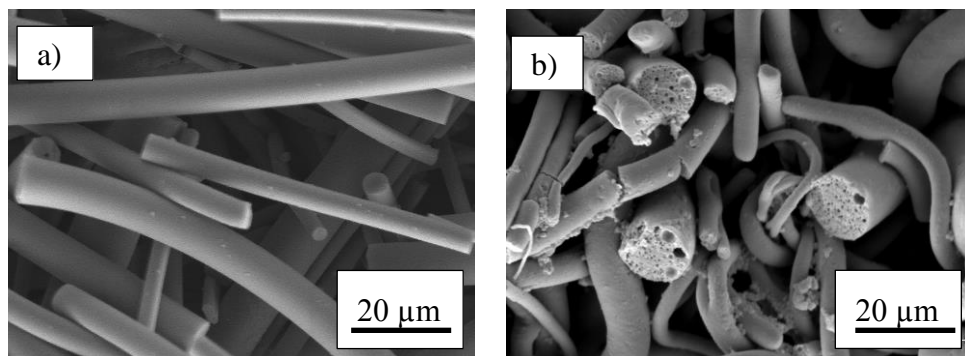
Jak jsou fólie biodegradabilní, bylo testováno pomocí kompostovacího testu. Fólie byla vložena do kompostu po dobu 42 dní a degradace se projevila poklesem redukované viskozity v porovnání s materiálem, který nebyl vložen do kompostu. Za 60 dní došlo u

fólie k úplné degradaci. Následující obr. 35 zobrazuje SEM snímky pořízené během kompostovacího testu.



Obr. 35: Test biodegradability připravené fólie z kopolymeru A (PET/LA): a) Vzorek fólie před testem; b) Vzorek fólie vytažený z kompostu po 6 týdnech

Připravené mikrovláknenné vrstvy pomocí metody melt-blown z biodegradabilního kopolymeru PET/LA byly vystaveny enzymatickému působení kmenu *Thermonospora Fusca*. Na následujícím obr. 36 jsou zobrazeny SEM snímky mikrovláknenné membrány před biodegradací a po ní.



Obr. 36: SEM snímky vláknenné vrstvy vyrobené technologií melt-blow: a) Vrstva vláken před biodegradací; b) vrstva vláken po biodegradaci

Z obrázku je zřejmé, že biodegradace vrstvy vláken se uskutečnila. Na snímku b) obr. 36 je vidět jak probíhala biodegradace v první fázi. Lze říci, že se vlákna začala postupně rozkládat zevnitř.

Biodegradabilní test polymerní směsi CH/PEO

Postup testu biodegradability byl převzat z Kompostovacího testu, který je stručně popsán v kapitole 1.7. Test byl realizován v laboratorních podmínkách v akváriu.

Z akvária byly po 14 dnech vytaženy všechny vzorky, celkem 15 vzorků. Vzorky byly očištěny od zeminy, která na nich ulpěla a vysušeny po dobu 3 hodiny při 50 °C. Dále byly postupně zváženy a jejich hmotnosti byly zapsány do tab. 7, do sloupce Hmotnost po 14 dnech.



a)

b)

c)

Obr. 37: Vážení vzorků po vytažení z kompostu: a) Nano-vláknenná membrána; filtr typu melt-blown s nano-vláknennou membránou v plošné hmotnosti 3 g/m²; c) folie z polymeru

V tab. 7 je možné porovnat rozdíl hmotností před a po kompostování jednotlivých forem polymerní směsi CH/PEO.

Vzorek	Hmotnost testovaného vzorku před kompostovacím experimentem [g]			Hmotnost testovaného vzorku po 14 dnech [g]		
	Nano-vlák. Membrána CH/PEO	Nano-filtr typu melt-blown, CH/PEO 3g/m ²	Fólie	Nano-vlák. Membrána CH/PEO	Nano-filtr typu melt-blown, CH/PEO 3g/m ²	Fólie
1	0,096	0,165	0,699	0,075	0,163	0,562
2	0,11	0,148	0,756	0,083	0,148	0,618
3	0,119	0,123	0,773	0,085	0,121	0,620
4	0,097	0,143	0,705	0,070	0,140	0,570
5	0,118	0,129	0,719	0,084	0,126	0,575

Tab. 7: Hmotnosti vzorků před testem a po testu biodegradace pro vzorky vytažené po 14 dnech

Po celou dobu kompostovacího testu, byla každý den zaznamenávána teplota a vlhkost v akváriu, jejichž hodnoty jsou uvedeny v příloze 4.

Úbytek hmotnosti byl spočítán podle vzorce (4)

$$\left(1 - \frac{\text{hmotnost vzorku po testu}}{\text{hmotnost vzorku před testem}}\right) * 100 \quad (4)$$

Výsledky úbytku hmotnosti pro vzorky vytažené po 14 dnech byly zaznamenány do následující tab. 8.

Vzorek	Úbytek hmotnosti vzorků vytažených z kompostu po 14 dnech [%]		
	Nano-vlák. membrána CH /PEO	Nano-filtr typu melt-blown, CH/PEO 3g/m²	Fólie
1	22	1,2	19,6
2	24,5	0,7	18,2
3	28,6	1,6	19,8
4	27,8	0,3	19
5	30	0,18	20

Tab 8: Úbytky hmotností jednotlivých vzorků vytažených z kompostu po 14 dnech

V předchozí tab. 7 jsou vypočítané hmotnostní úbytky vzorků po biodegradabilním testu kompostování jednotlivých forem polymerní směsi CH/PEO. Na první pohled je jasné, že nejvyšší hmotnostní úbytky měla nano-vlákenná membrána. Samotná nano-vlákenná membrána je hodně prodyšná, což je dáno technologií výroby. Díky pórům je nano-vlákenná membrána nejvíce přístupná pro okolní vlivy, jako jsou teplota, vlhkost, mikroorganismy.

2.9. Shrnutí výsledků testů biodegradace

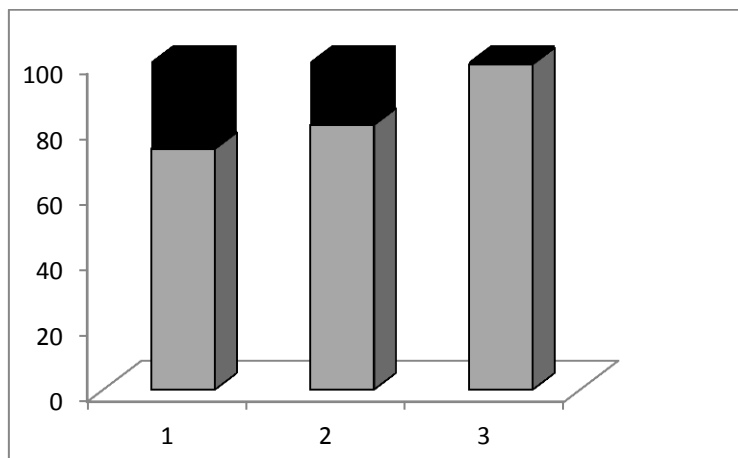
Vliv formy vzorku na jeho hmotnostní úbytek

V této kapitole budou vyjádřeny procentuální úbytky vzorků po biodegradabilním testu jednotlivých forem polymerní směsi CH/PEO.

Forma polymerní směsi CH/PEO	Nano-vlákenná membrána	Fólie	Nano-filtr typu melt-blown
Průměrný úbytek hmotnosti z pěti vzorků [%] po 14 dnech	26,5	19,32	0,796

Tab. 9: Průměrné procentuální úbytky vzorků po 14 dnech

V následujícím grafu 11 jsou zaznamenány výsledky testu biodegradability vytvořených vzorků z CH/PEO. Znázorněny jsou průměrné hodnoty z pěti vzorků z výsledných procentuálních hmotnostních úbytků po 14 dnech.

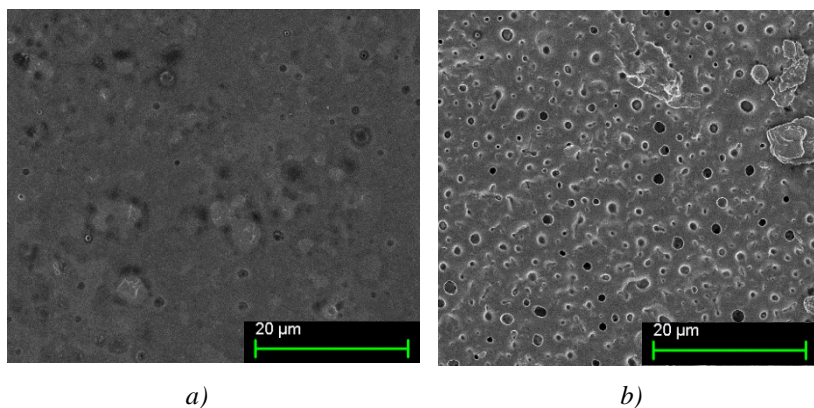


Graf 11: Hmotnostní úbytek vzorků po 14 dnech testu. Sloupec 1: nano-vlákenná membrána; sloupec 2: fólie; sloupec 3: filtr melt-blown s nano-vlákennou membránou

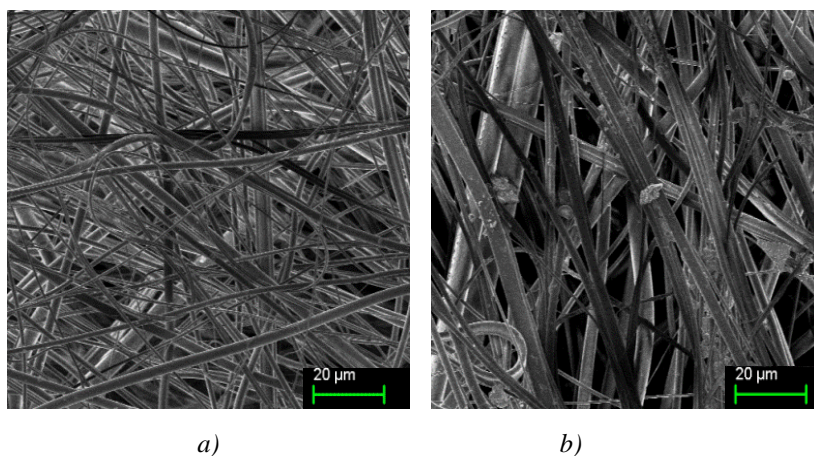
V grafu 11 je znázorněna průměrná hmotnost tří forem polymeru a to, nano-vlákenné membrány, fólie a nano-filtru typu melt-blown. Hmotnost před testem je pro všechny vzorky 100 %. Černou barvou je naznačen procentuální úbytek materiálu po biodegradabilním testu. Nejvyšší hmotnostní úbytek po testu měla nano-vlákenná membrána, která je v grafu 11 zaznamenána ve sloupci číslo 1, během 14 dní z její hmotnosti průměrně ubylo necelých 27 %. Takto velký úbytek hmotnosti je dán velkým měrným povrchem nano-vlákenné vrstvy a velkou pórovitostí, což zaručí vysokou prodyšnost. Nano-vlákenná membrána je pak velice dobře přístupná okolním vlivům jako jsou teplota, vlhkost a mikroorganismy. Sloupec číslo 2 ukazuje hmotnostní úbytek vytvořené fólie, který je 19 %. Nejnižší hmotnostní úbytek má filtr typu melt-blown s nano-vlákennou membránou, v tomto případě degradovaly najednou dvě složky, biodegradabilní netkaná textilie a nano-vlákenná membrána. Tento vzorek byl tvořen dvěma druhy biodegradabilního materiálu a to CH/PEO nano-vlákenné membrány a PET/LA melt-blownového podkladu. Jelikož polymer PET/LA degraduje daleko pomaleji, než polymerní směs CH/PEO, lze předpokládat, že tím byla způsobena pomalejší biodegradace finálního filtru. Důvodem je, že nano-vlákenná vrstva tvoří pouze 13 % z celkové hmotnosti filtru. Důležité je, že u každého vzorku je vidět úbytek hmotnosti před a po testu.

Snímky SEM polymerní směsi CH/PEO v různých formách před a po testech biodegradace

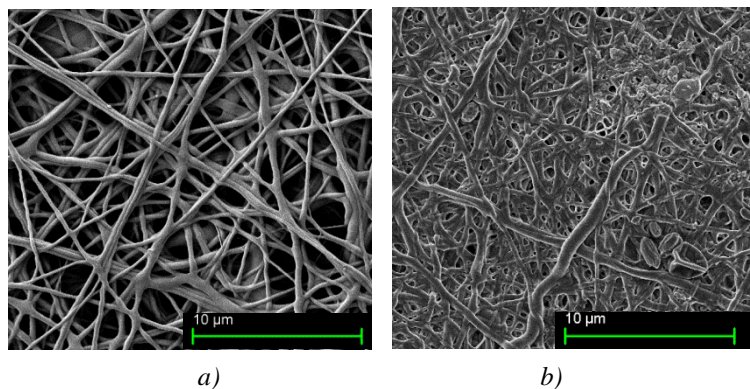
Na obr. 38 b) snímku fólie po degradaci jsou jasně viditelné trhliny ve fólii. To naznačuje započatou degradaci. Na obr. 39 a) snímku před degradací jsou vidět hladká vlákna, na snímku po degradaci jsou vlákna částečně deformována a nabotnalá. Na obr. 40 b) snímku po degradaci je vidět nano-vlákenná membrána, která vlivem podmínek, které na ni působily během biodegradabilního testu nabotnala a více méně se slila do fólie. Tento jev lze přiřadit počátku degradace, která byla prokázána biodegradabilním testem, viz kapitola Biodegradabilní test polymerní směsi CH/PEO.



Obr. 38: SEM snímky fólie CH/PEO: a) Fólie před biodegradabilním testem, b) Fólie po biodegradabilním testu, po 14 dnech.



Obr. 39: SEM snímky melt-blown filtru s nano-vlákennou membránou CH/PEO: a) filtr před biodegradabilním testem, b) filtr po biodegradabilním testu, po 14 dnech



Obr. 40: SEM snímky nano-vlákněné membrány CH/PEO v plošné hmotnosti 3 g/m^2 : a) Nano-vlákněná membrána před biodegradabilním testem, b) Nano-vlákněná membrána po biodegradabilním testu, po 14 dnech

2.10. Shrnutí dosažených výsledků

Součástí zadání této diplomové práce mimo jiné bylo vypracovat rešerši o výhodách použití nano-vláken ve vzduchové filtraci. Hlavním cílem bylo vytvořit biodegradabilní filtrační materiál a ten dále otestovat z hlediska filtrační efektivity a tlakového spádu. Byl vytvořen filtr s biodegradabilní nano-vlákněnou membránou z CH/PEO v kombinaci se spun-bondem a filtr, který byl celý z biodegradabilního materiálu a byl vytvořen zvlákněním nano-vlákněné membrány na substrát typu melt-blown, který byl z materiálu PET/LA.

Elektrostatickým zvlákněním roztoku CH/PEO při nalezení optimálních podmínek byla úspěšně zvlákněna nano-vlákněná membrána na dva odlišné substráty zmíněné výše o různých plošných hmotnostech. Na podkladový substrát typu melt-blown byla nano-vlákněná membrána zvlákněna v plošné hmotnosti 3 g/m^2 , na spun-bondový substrát byly zvlákněny tři plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány a to 1 , 3 a 5 g/m^2 . Vliv různé plošné hmotnosti na vlastnosti ukázal, že čím je větší plošná hmotnost nano-vlákněné membrány, tím se zvyšuje filtrační efektivita a filtr je schopen zachytit více částic. Pro filtr tvořený nano-vlákněnou membránou o plošné hmotnosti 5 g/m^2 byla zjištěna filtrační efektivita velikosti částic 500 nm přibližně $98,7\%$. Pro filtr s nano-vlákněnou membránou o plošné hmotnosti 3 g/m^2 dosahovala filtrační efektivita zachytu částic o velikosti 500 nm hodnoty $85,4\%$. Z tohoto pohledu je možné tvrdit, že pouhým zvýšením plošné hmotnosti nano-vlákněné membrány z 3 na 5 g/m^2 je možné zvýšit efektivitu filtru o přibližně 13% . Zajímavé bylo porovnat filtry se stejnou plošnou

hmotností nano-vláknenné membrány, ale s odlišným podkladovým substrátem. Filtr o plošné hmotnosti 3 g/m^2 v kombinaci s melt-blownem měl vyšší filtrační efektivitu, než filtr o stejné plošné hmotnosti s podkladovým substrátem ze spun-bondu. Je možné tvrdit, že změnou podkladového substrátu, lze získat vyšší filtrační efektivitu. Porovnání vytvořených filtrů z hlediska růstu tlakového spádu při dávkování stejného množství částic dokazuje, že filtry s vyšší plošnou hmotností se rychleji zanesou, než filtry s nižší plošnou hmotností. Filtr s plošnou hmotností 5 g/m^2 nano-vláknenné membrány, což je nejvyšší plošná hmotnost z testovaných filtrů, jehož tlakový spád na začátku měření byl $301,7 \text{ Pa}$ a za 1 minutu měření extrémně vzrostl na $389,3 \text{ Pa}$ je schopný zachytit MPPS částice o rozměrech 120 nm až 505 nm s 95% účinností. Z hodnoty tlakového spádu, která během experimentu narostla nejvíce ze všech, lze říci, že filtr je schopen filtrovat částice MPPS pouze po omezenou dobu, má krátkou životnost, a je nutné jej brzy vyměnit. Může být vhodný do nemocnic, kde je důležité odfiltrovat částice o nano-rozměrech jako jsou bakterie a viry s tím, že filtr poslouží jen určitou dobu, například po dobu provedení operace. Při plošné hmotnosti nano-vláknenné membrány 1 g/m^2 vzrostl tlakový spád po dobu měření ze 17 na $19,7 \text{ Pa}$. Podle nepatrného zvýšení tlakového spádu, lze říci, že se filtr ze všech testovaných filtrů zanesl nejméně, tomu by měla odpovídat i jeho životnost, měla by být vyšší než u ostatních filtrů. Dalším bodem zadání diplomové práce bylo prošetřit vliv plošné hmotnosti na tlakový spád. Tento faktor byl zjišťován pro záchyt částic o velikostech 120 až 505 nm . Pro dosažení požadované filtrace s rozumným investováním do nových filtrů, je žádoucí nejvyšší filtrační efektivita při co nejnižším tlakovém spádu. Nejvyšší záchyt z testovaných filtrů dosahovaly filtry s plošnou hmotností 5 g/m^2 nano-vláknenné membrány v kombinaci se spun-bondem a filtr typu melt-blown s plošnou hmotností nano-vláknenné membrány 3 g/m^2 . Na druhou stranu však vykazují vysoký počáteční tlakový spád.

V diplomové práci je i srovnání nano-filtrů s komerčními filtry z hlediska filtrační efektivity a tlakového spádu. Pro lepší představu je výhodnější srovnávat filtrační efektivitu odpovídající jedné velikosti částic pro všechny filtry stejnou. V tomto případě byla zvolena velikost filtrovaných částic 407 nm . Zajímavé je porovnání filtru typu melt-blown s plošnou hmotností nano-vláknenné membrány 3 g/m^2 a filtru z PU nano-vláken o plošné hmotnosti $2,3 \text{ g/m}^2$. Z grafu 9 je vidět nepatrně vyšší filtrační efektivita u filtru typu melt-blown. Lze říci, že je to způsobené vyšší plošnou hmotností nano-vláknenné membrány. Tato závislost byla potvrzena v kapitole 2.7. Filtr typu melt-blown o plošné

hmotnosti 3 g/m^2 nano-vláknenné membrány, má nejen o necelé 2 % vyšší filtrační efektivitu zachytu částic velikost 407 nm, ale je i vyroben z biodegradabilního materiálu na rozdíl od filtru z PU. Nejhorších výsledků dosahuje komerční filtr mikrovláknenný, jehož filtrační efektivita dosahuje hodnoty pouze 56 %. Filtry byly také porovnávány z hlediska tlakového spádu a to při zachytu částic o rozsahu velikostí 102 až 505 nm. Lze říci, že tato velikost částic patří do MPPS. Filtr s nano-vláknennou membránou CH/PEO o plošné hmotnosti 3 g/m^2 v kombinaci s melt-blownem, má filtrační efektivitu při zachytu částic v rozmezí velikostí 102 až 505 nm 89,78% při tlakovém spádu 171 Pa. Filtrační efektivitu má shodnou s filtrem z PU nano-vláken v plošné hmotnosti $2,3 \text{ g/m}^2$. Tlakový spád má filtr z PU nano-vláken o plošné hmotnosti $2,3 \text{ g/m}^2$ o něco nižší, než filtr CH/PEO o plošné hmotnosti 3 g/m^2 v kombinaci s melt-blownem, což může být způsobeno nižší plošnou hmotností o $0,7 \text{ g/m}^2$, tato hodnota může hrát významnou roli v rozdílu filtračních efektivit. Z grafu 10 nelze tvrdit, který filtr je lepší nebo horší, záleží na účelu použití a podle toho se zvolí parametry filtru. Z pohledu ekologického lze říci, že filtr CH/PEO v kombinaci s melt-blownem o plošné hmotnosti nano-vláknenné membrány 3 g/m^2 je lepší než PU filtr, protože je celý z biodegradabilního materiálu a lze jej ekologicky likvidovat.

Biodegradabilita filtru byla dokázána testem biodegradability, který byl realizován v laboratorních podmínkách podle kompostovacího testu. Z CH/PEO byly vytvořeny tři formy polymeru a to nano-vláknenná membrána, fólie a nano-filtr typu melt-blown, který byl tvořen dvěma druhy biodegradabilního materiálu a to CH/PEO nano-vláknennou membránou a PET/LA melt-blownovým podkladem. Tyto vzorky byly na 14 dní vloženy do kompostu. Po 14 dnech byly znovu zváženy a byl vypočítán procentuální hmotnostní úbytek každé formy polymeru. Z výsledných hodnot lze tvrdit, že test biodegradability dopadl úspěšně a degradace polymeru CH/PEO byla potvrzena. Nejlépe se projevila samotná nano-vláknenná vrstva, která po 14 dnech v kompostu zdegradovala téměř o 27 %. Takto velký úbytek hmotnosti je dán velkým měrným povrchem nano-vláknenné vrstvy a velkou pórovitostí, což zaručí vysokou prodyšnost. Degradace se podle SEM snímků projevila tím, že vlákna nabotnala a více či méně se slila do fólie. Druhá testovaná forma polymeru byla fólie, která po 14 dnech zdegradovala o 19 %. Na pořízených SEM snímkách jsou vidět trhliny, které dokazují počátek degradace. Nejnižší hmotnostní úbytek dosáhl nano-filtr typu melt-blown, v tomto případě degradovaly najednou dvě složky, biodegradabilní netkaná textilie PET/LA a nano-vláknenná membrána CH/PEO. Jelikož polymer PET/LA degraduje daleko pomaleji, než polymerní směs CH/PEO, lze

předpokládat, že tím byla způsobená pomalejší biodegradace finálního filtru. Důvodem je, že nano-vlákenná vrstva tvoří pouze 13 % z celkové hmotnosti filtru. Z těchto získaných dat lze prohlásit test biodegradability za úspěšný.

Závěr

V rešeršní části je popsána výroba nano-vlákenných membrán metodou elektrostatického zvlákňování. V další části je obecně popsána vzduchová filtrace a použití nano-vlákien v této oblasti. K popsání této problematiky byly prostudovány dostupné studie o použití nano-vlákien ve filtraci.

V experimentální části byl zvolen biodegradabilní polymer CH/PEO, ze kterého byla následně vytvořena nano-vlákenná membrána. Na začátku experimentu bylo nutné stanovit podmínky zvlákňování pro vytvoření biodegradabilní nano-vlákenné membrány. Dalším bodem byla samotná výroba filtrů, k tomu byly zvoleny dva substráty spun-bond a melt-blown. Spun-bond je klasicky vyroben z PP a melt-blown byl vyroben na TUL z biodegradabilního polymeru ze směsi PET/LA. Z biodegradabilního polymeru byla na zvolené substráty zvlákňována nano-vlákenná membrána, zvlákňování probíhalo v různých časech a tím se dosáhlo různé plošné hmotnosti nano-vlákenné membrány. Následně byl sledován vliv plošných hmotností na filtrační efektivitu a tlakový spád na zařízení MFP 1000 HEPA. Posledním bodem bylo prošetřit vliv různých substrátů na filtrační efektivitu a tlakový spád. Všechny body zadání DP byly úspěšně splněny a nad rámec byla vypracována část týkající se biodegradability vyrobeného filtru.

V diplomové práci bylo zjištěno a dokázáno, že existují i jiné materiály, ze kterých lze vyrobit filtr s dostatečnými parametry použitelné v reálných podmínkách, které budou navíc šetrné k životnímu prostředí. S úspěchem byl vytvořen filtr z biodegradabilního materiálu, který je schopen odfiltrovat nejen bakterie. Výroba biodegradabilních filtrů by mohla v budoucnu lidstvu odlehčit z hlediska hromadění odpadu. Jelikož jsou filtry nezbytné v mnoha aplikacích, budou se stále vyrábět a jejich výroba poroste a s tím i starosti kam s použitými filtry.

Použitá literatura

- [1] Hrůza, J.: Přednáška *Filtrace a filtrační materiály*. Dostupné z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/filtr.pdf>>.
- [2] Purchas, D.B. and Sutherland, K.: *Handbook of Filter Media* (2nd Edition), Elsevier Advanced Technology, 2002.
- [3] Hrůza, J.: *Přednáška Filtration part I*. Dostupné z WWW: <<http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/tpa/filtration1.ppt>>.
- [4] Hrůza, J.: Přednáška *Automobilové filtry I*. Dostupné z WWW: <http://www.ft.tul.cz/depart/knt/web/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=52&Itemid=36>.
- [5] Filtrace: Proudění porézním médiem. In: *Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: Ústav organické technologie* [online]. [cit. 2012-11-13]. Dostupné z WWW: <<http://tresen.vscht.cz/kot/wp-content/uploads/2010/filtrace/2010-08-proudění-por%C3%A9znim-mediem-filtrace-3x2.pdf>>.
- [6] Produkty: Filtrační média. *KS Klima-Service a.s.* [online]. 2002 [cit. 2012-11-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.ksklimaservice.cz/cz/filtracni-media>>.
- [7] Vzduchové filtry. *Filkom s.r.o.: filtrační elementy* [online]. 2008 [cit. 2012-11-25]. Dostupné z WWW: <<file:///E:/filtrace/FILKOM%20s.r.o.%20%20Vzduchov%C3%A9%20filtry.htm>>.
- [8] Filtry: Tlakové filtry. *Filtration technology s.r.o.* [online]. 2007 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.filtration.cz/wp-content/uploads/2012/03/skelna-vlakna-vs-celuloza.pdf>>.
- [9] Vzduchové filtry: Katalog filtrů. *EWAC s.r.o.: ecologie.water.air.colours* [online]. [cit. 2012-12-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.ewac.cz/pictures/Pdf/katalog-ewac.pdf>>.
- [10] KROISOVÁ, Dora. *Biodegradovatelné polymery - úvod do problematiky*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 78 s. ISBN 978-80-7372-468-9.
- [11] Testování biodegradability (1997). SLEJŠKA, Antonín. *Biom.cz: biomasa, biopaliva, bioplyn, pelety, kompostování a jejich využití* 2001 [cit. 2013-03-29].
- [12] RŮŽIČKOVÁ, Jana. *Elektrostatické zvláknování nanovláken*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2004, 54 s. ISBN 80-708-3867-1.
- [13] Technologie Nanospider. *Elmarco.cz: nano for life* [online]. 2004 [cit. 2012-10-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.elmarco.cz/technologie/technologie/>>.
- [14] Ramakrishna, S. et al.: *An Introduction to Electrospinning and nanofibers*, World Scientific Publishing, Singapore, 2005.
- [15] Nanovláknenné filtry a jejich použití v sanačních technologiích. In: *Výzkumné centrum: Pokročilé sanační technologie a procesy* [online]. 2005-2011 [cit. 2013-02-27]. Dostupné z WWW: <<http://artec.tul.cz/?content=upload/ARTEC-kapitola6-sidlof-hruza.pdf&lang=cs>>.
- [16] Air Filtration: Filtrace vzduchu. *Elmarco: nano for life* [online]. 2004 [cit. 2012-10-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.elmarco.cz/aplikace/filtrace-vzduchu/>>.

- [17] Jirsák, O., a kol.: Prezentace Výroba a vlastnosti nanovláken. Dostupné z WWW: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=vyroba%20a%20vlastnosti%20nanovlaken&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CD0QFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ft.tul.cz%2Fdepart%2Fknt%2Fno ve%2Fdokumenty%2Fstudmaterialy%2Fnt%2Fnanoact.ppt&ei=DIcqUczQB-mn4ATPn4GIC w&usg=AFQjCNEY1px5ze28_PD9QyzYex3DhZ8qDA&bvm=bv.42768644,d.d2k>.
- [18] PETRÁŠ, David, Dušan KIMMER, Karel SOUKUP a Petr KLUSOŇ. Chemické listy. *Bezpečná nanovlákná*. 2009, č. 103, s. 1009-1016.
- [19] Vzduchové filtry s nanovlákný. *NAFIGATE: nanofibers gateway* [online]. [cit. 2012-12-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.nafigate.com/cs/section/portal/app/portal-article/detail/4420-vzduchove-filtry-s-nanovlakny>>.
- [20] Produkty: úvodní informace. *INNOFIBERS s.r.o.: nanofibrous materials for air filtration* [online]. 2009 [cit. 2012-12-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.innofibers.com/cz/product.html>>.
- [21] FILIPOVÁ, Zuzana, Jana KUKUTSCHOVÁ a Miroslav MAŠLÁŇ. *Rizika nanomateriálů*. 1. vyd. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012, 87 s.
- [22] KLOUDA, Karel. Možná rizika nanočástic pocházejících z antropogenních zdrojů. In: *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=nebezpeci+vdechovani+nanocastic&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.issa.int%2Fcontent%2Fdownload%2F135416%2F2754747%2Ffile%2Fsl-Klouda.pdf&ei=gEREUcqTNMbOswbn54DQDg&usg=AFQjCNELa21se2BE7n1kwwTIqmBhcX7wjg&bvm=bv.43828540,d.Yms>>.
- [23] PODGÅRSKI, Albert, Anna BAÅÅZY, Leon GRADOÅÅ, Pei-Tzu CHIANG a Hsiao-Yu LEE. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. *Chemical Engineering Science* 2006, roč. 61, č. 20, s.
- [24] BALAMURUGAN, Ramalingam, Subramanian SUNDARRAJAN a Seeram RAMAKRISHNA. Recent Trends in Nanofibrous Membranes and Their Suitability for Air and Water Filtrations. *Membranes* 2011, roč. 1, č. 4, s. 232-248
- [25] GRAHAM, Kristine, et al. Polymeric nanofibers in air filtration applications. In: *Proceedings of the Fifteen Annual Technical Conference and Expo of the American Filtration and Separations Society*, Galveston, Texas. 2002.
- [26] BARHATE, R.S., Chong Kian LOONG a Seeram RAMAKRISHNA. Preparation and characterization of nanofibrous filtering media. *Journal of Membrane Science* 2006, roč. 283, 1-2, s. 209-218
- [27] FACCINI, M, D AMANTIA, S VÃJQUEZ-CAMPOS, C VAQUERO, J M LÃ³pez de IPIÃ±A a L AUBOUY. Nanofiber-based filters as novel barrier systems for nanomaterial exposure scenarios. *Journal of Physics: Conference Series* 2011-07-06, roč. 304, s. 012067
- [28] What is chitin/chitosan. *Crabyon.it* [online]. [cit. 2012-11-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.crabyon.it/whatis.html>>.
- [29] Polyethylene glycol. *Chemindustry.ru* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z: http://chemindustry.ru/Polyethylene_Glycol.php
- [30] Šašek V. , Prokopová I., Brožek J., Novotný Č., Turečková J., Kutáčová M., Erbanová P., Náhlík J.: *Biodegradability study of newly-synthesized polymers*. 4th European Bioremediation Conference, Chania, Crete 2008.

- [31] Kyselina citronová. *Merck Millipore Czech Republic* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z WWW: <http://www.merckmillipore.com/czech-republic/chemicals/kyselina-citronova/MDA_CHEM-100241/p_4W.b.s1LXYgAAAEWbuEfVhTl>.
- [32] Triton X-100 (CAS 9002-93-1). *Santa cruz biotechnology* [online]. [cit. 2013-05-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.scbt.com/datasheet-29112-triton-x-100.html>>.
- [33] Triton X-100. *SIGMA-ALDRICH* [online]. [cit. 2013-03-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/x100?lang=en&ion=CZ>>.
- [34] DAHIYA, Atul, M.G. KAMATH a Raghavendra R. HEGDE. SPUNBOND TECHNOLOGY. *The library in the university: The university of Tennessee library lectures 1949-1966* 1st Ed. Hamden: Shoe String Press, 1967
- [35] JIRSÁK, Oldřich a Klára KALINOVÁ. *Netkané textilie*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 2003, 129 s. ISBN 80-708-3746-2.
- [36] DAHIYA, Atul, M.G. KAMATH a Raghavendra R. HEGDE. MELT BLOWN TECHNOLOGY. *The library in the university: The university of Tennessee library lectures 1949-1966* 1st Ed. Hamden: Shoe String Press, 1967
- [37] MFP 1000 HEPA I Modular Filter Test System. *Palas: Aerosol Technologie Partikel Technologie* [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.palas.de/en/product/mfp>>.
- [38] MARTINOVA, L.; LUBASOVA, D., Electrospun Chitosan Based Nanofibers, *Research Journal of Textile and Apparel*, 2008, roč. 12, č. 2, s. 72-79.
- [39] Aerosol Accessories - Sampling Systems: Aerosol Liquid for Atomizer DEHS. *TOPAS: Technologie-orientierte Partikel-, Analysen- und Sensortechnik* [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z WWW: <http://www.topas-gmbh.de/_DEHS_en.htm>.

Seznam příloh

- Příloha 1: Data vyhodnocená z přístroje MFP 1000 HEPA pro filtry s nano-vláknennou membránou z CH/PEO zvlákněnou na netkanou textilií typu spun-bond
- Příloha 2: Data vyhodnocená z přístroje MFP 1000 HEPA pro filtry s nano-vláknennou membránou z CH /PEO zvlákněnou na netkanou textilií typu melt-blown
- Příloha 3: Hodnoty filtračních efektivit komerčních filtrů
- Příloha 4: Hodnoty teploty a vlhkosti v akváriu

Příloha 1:

Data vyhodnocená z přístroje MFP 1000 HEPA pro filtry s nanovláknennou membránou z Chitosan/PEO zvlákněnou na netkanou textilii typu spunbond

Plošná hmotnost nanovláknenné membrány 0g/m²

Vzorek 1			
Testovaná plocha filtru:	100 cm ²	Tlakový spád na začátku měření:	2 Pa
Rychlost proudění vzduchu:	5 cm/s	Tlakový spád na konci měření:	2 Pa
Druh aerosolu:	DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu:	30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 1 plošné hmotnosti 0g/m²

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup Xu [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1549,435	1491,443	100,7497	6,250264
0,124	0,129	0,133	0,009	3004,075	3128,944	99,6923	7,3077
0,133	0,138	0,143	0,01	3262,781	3329,41	100,9374	6,06257
0,143	0,149	0,154	0,011	3994,553	3855,542	101,0645	5,935514
0,154	0,16	0,165	0,011	3525,294	3747,042	100,0351	6,964949
0,165	0,172	0,178	0,012	3267,582	3166,043	100,082	6,917981
0,178	0,184	0,191	0,013	3166,141	3129,527	101,2219	5,77812
0,191	0,198	0,205	0,014	3329,692	3405,848	100,0426	6,957404
0,205	0,213	0,221	0,015	3250,087	3323,853	100,023	6,977042
0,221	0,229	0,237	0,016	3265,385	3266,088	100,2226	6,777356
0,237	0,246	0,255	0,018	2834,893	2744,016	98,90057	8,099426
0,255	0,264	0,274	0,019	2036,196	2032,979	99,93503	7,064973
0,274	0,284	0,294	0,02	1432,793	1370,118	98,16801	8,831993
0,294	0,305	0,316	0,022	1201,485	1297,382	97,92986	9,070138
0,316	0,328	0,34	0,024	1186,497	1081,924	97,49406	9,505936
0,34	0,352	0,365	0,025	1178,688	1126,868	99,05729	7,942709
0,365	0,379	0,392	0,027	1116,502	1090,41	100,6321	6,367941
0,392	0,407	0,422	0,029	1052,233	1089,74	102,7476	4,252405
0,422	0,437	0,453	0,031	920,464	1086,291	105,4846	1,515366
0,453	0,47	0,487	0,034	1035,197	1053,787	104,1204	2,879633
0,487	0,505	0,523	0,036	887,993	978,923	106,5266	0,473402

0,523	0,543	0,562	0,039	782,604	710,931	104,9691	2,030943
0,562	0,583	0,604	0,042	524,776	620,839	106,6951	0,304947
0,604	0,627	0,649	0,045	494,69	534,671	102,9257	4,074271
0,649	0,674	0,698	0,048	427,761	477,38	104,8782	2,121845
0,698	0,724	0,75	0,052	484,681	438,356	105,669	1,330987
0,75	0,778	0,806	0,056	369,68	371,926	103,2986	3,701418
0,806	0,836	0,866	0,06	305,685	379,391	100,4556	6,544362
0,866	0,898	0,931	0,065	293,434	280,598	102,8689	4,131116
0,931	0,965	1	0,069	294,08	282,844	104,6697	2,330251
1	1,037	1,075	0,075	227,98	233,846	99,84196	7,158044
1,075	1,115	1,155	0,08	210,16	232,499	102,856	4,143964
1,155	1,198	1,241	0,086	177,048	168,706	105,5286	1,471362
1,241	1,287	1,334	0,093	167,443	187,498	104,1932	2,806762
1,334	1,383	1,433	0,099	128,269	141,8	103,0065	3,993496
1,433	1,486	1,54	0,107	98,441	94,338	98,08122	8,918784
1,54	1,597	1,655	0,115	59,037	61,289	88,56311	18,43689
1,655	1,717	1,778	0,123	60,358	42,65	95,7258	11,2742
1,778	1,845	1,911	0,133	48,779	30,782	90,58187	16,41813
1,911	1,982	2,054	0,143	9,263	16,952	97,51072	9,489281
2,054	2,13	2,207	0,153	22,209	15,571	99,95366	7,046343
2,207	2,289	2,371	0,165	6,993	11,338	104,9863	2,013728
2,371	2,46	2,548	0,177	12,988	10,764	80,30734	26,69266
2,548	2,643	2,738	0,19	7,966	7,032	68,80388	38,19613

Vzorek 2

Testovaná plocha filtru: 100 cm² **Tlakový spád na začátku měření:** 3 Pa

Rychlost proudění vzduchu: 5 cm/s **Tlakový spád na konci měření:** 3 Pa

Druh aerosolu: DEHS **Celkový objemový průtok vzduchu:** 30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 2 plošné hmotnosti 0g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup Xu [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1661,761	1520,284	93,39721	11,10279

0,124	0,129	0,133	0,009	2994,929	2702,774	94,60689	9,893114
0,133	0,138	0,143	0,01	2991,631	2883,211	95,19472	9,305277
0,143	0,149	0,154	0,011	3755,841	3586,135	95,56294	8,937063
0,154	0,16	0,165	0,011	3182,141	3164,499	96,2926	8,2074
0,165	0,172	0,178	0,012	2911,389	2857,06	97,50413	6,995867
0,178	0,184	0,191	0,013	2871,362	2807,395	97,55427	6,94573
0,191	0,198	0,205	0,014	2969,664	2868,517	97,66971	6,830288
0,205	0,213	0,221	0,015	2883,405	2846,664	97,39567	7,104335
0,221	0,229	0,237	0,016	2793,433	2702	96,40322	8,096783
0,237	0,246	0,255	0,018	2332,939	2246,378	96,26954	8,23046
0,255	0,264	0,274	0,019	1734,563	1691,672	96,51164	7,988357
0,274	0,284	0,294	0,02	1283,645	1170,515	98,16648	6,333522
0,294	0,305	0,316	0,022	1042,017	1009,053	99,37033	5,129673
0,316	0,328	0,34	0,024	1013,487	996,143	98,36291	6,137086
0,34	0,352	0,365	0,025	910,067	1014,676	98,57838	5,921619
0,365	0,379	0,392	0,027	947,674	999,17	98,78698	5,713016
0,392	0,407	0,422	0,029	963,146	859,489	98,4295	6,070505
0,422	0,437	0,453	0,031	948,89	939,739	96,83335	7,666648
0,453	0,47	0,487	0,034	943,25	873,893	94,59193	9,908069
0,487	0,505	0,523	0,036	781,243	736,979	92,90283	11,59717
0,523	0,543	0,562	0,039	688,086	599,431	95,84236	8,657641
0,562	0,583	0,604	0,042	554,767	524,919	94,6199	9,880104
0,604	0,627	0,649	0,045	498,939	465,66	95,43752	9,062476
0,649	0,674	0,698	0,048	429,25	475,963	96,90566	7,594345
0,698	0,724	0,75	0,052	376,636	340,774	97,85541	6,644586
0,75	0,778	0,806	0,056	321,695	316,453	99,01611	5,483894
0,806	0,836	0,866	0,06	272,153	285,309	104,4709	0,029075
0,866	0,898	0,931	0,065	278,329	260,972	100,3082	4,191773
0,931	0,965	1	0,069	256,285	263,517	99,0408	5,459199
1	1,037	1,075	0,075	160,431	234,254	98,30767	6,192327
1,075	1,115	1,155	0,08	226,701	182,893	95,32177	9,178234
1,155	1,198	1,241	0,086	193,746	158,109	96,06084	8,439157
1,241	1,287	1,334	0,093	130,228	121,423	97,92231	6,577692
1,334	1,383	1,433	0,099	107,839	90,271	94,34765	10,15235
1,433	1,486	1,54	0,107	76,946	76,129	97,08904	7,410965
1,54	1,597	1,655	0,115	61,391	72,889	96,9278	7,5722
1,655	1,717	1,778	0,123	34,799	37,215	92,00227	12,49773
1,778	1,845	1,911	0,133	26,326	26,291	92,95261	11,54739
1,911	1,982	2,054	0,143	9,409	7,572	87,40188	17,09813
2,054	2,13	2,207	0,153	15,395	9,046	70,86263	33,63737
2,207	2,289	2,371	0,165	8,746	7,904	57,03895	47,46105
2,371	2,46	2,548	0,177	8,941	5,372	71,34392	33,15608

Vzorek 3			
Testovaná plocha filtru:	100 cm ²	Tlakový spád na začátku měření:	3 Pa
Rychlost proudění vzduchu:	5 cm/s	Tlakový spád na konci měření:	3 Pa
Druh aerosolu:	DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu:	30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 3 plošné hmotnosti 0g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup Xu [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1654,372	1490,667	96,09481	11,06519
0,124	0,129	0,133	0,009	2850,495	2661,087	97,25212	9,907884
0,133	0,138	0,143	0,01	2797,831	2749,34	97,01807	10,14193
0,143	0,149	0,154	0,011	3392,149	3484,577	96,91975	10,24025
0,154	0,16	0,165	0,011	3156,559	3217,084	98,73031	8,429689
0,165	0,172	0,178	0,012	2825,757	2708,427	99,91767	7,242331
0,178	0,184	0,191	0,013	2665,929	2568,084	100,7815	6,378526
0,191	0,198	0,205	0,014	2771,526	2850,738	101,3114	5,84857
0,205	0,213	0,221	0,015	2775,878	2822,929	101,2835	5,876533
0,221	0,229	0,237	0,016	2580,364	2696,685	103,4776	3,682395
0,237	0,246	0,255	0,018	2250,967	2403,907	103,042	4,118048
0,255	0,264	0,274	0,019	1625,916	1653,792	103,5423	3,617675
0,274	0,284	0,294	0,02	1108,615	1248,536	103,9424	3,217576
0,294	0,305	0,316	0,022	1129,421	1053,526	103,0967	4,063312
0,316	0,328	0,34	0,024	881,731	940,827	102,5077	4,65232
0,34	0,352	0,365	0,025	926,429	969,752	103,2516	3,908356
0,365	0,379	0,392	0,027	919,627	904,851	101,8755	5,284549
0,392	0,407	0,422	0,029	977,281	999,665	102,3473	4,812737
0,422	0,437	0,453	0,031	924,012	992,423	101,6281	5,53194
0,453	0,47	0,487	0,034	909,685	924,227	101,4174	5,742573
0,487	0,505	0,523	0,036	792,983	765,886	103,3266	3,83338
0,523	0,543	0,562	0,039	614,91	622,674	103,9965	3,163506
0,562	0,583	0,604	0,042	537,067	553,637	103,1271	4,032868
0,604	0,627	0,649	0,045	407,298	461,568	104,9394	2,220568
0,649	0,674	0,698	0,048	383,101	411,619	106,4019	0,758146
0,698	0,724	0,75	0,052	372,166	375,197	106,0188	1,141181
0,75	0,778	0,806	0,056	268,328	312,954	104,8857	2,274286

0,806	0,836	0,866	0,06	297,56	319,338	106,0351	1,12488
0,866	0,898	0,931	0,065	279,389	275,381	105,0169	2,143111
0,931	0,965	1	0,069	210,507	200,111	107,1539	0,006147
1	1,037	1,075	0,075	182,365	227,398	102,3353	4,824713
1,075	1,115	1,155	0,08	201,582	201,18	100,2153	6,944703
1,155	1,198	1,241	0,086	160,721	190,804	101,1111	6,048949
1,241	1,287	1,334	0,093	138,134	111,239	101,6609	5,499114
1,334	1,383	1,433	0,099	104,995	96,574	98,85824	8,301759
1,433	1,486	1,54	0,107	80,513	84,604	98,91504	8,244958
1,54	1,597	1,655	0,115	53,254	52,674	89,4945	17,6655
1,655	1,717	1,778	0,123	41,383	41,46	84,95362	22,20638
1,778	1,845	1,911	0,133	29,789	29,848	80,42708	26,73292
1,911	1,982	2,054	0,143	19,852	9,891	85,46973	21,69027
2,054	2,13	2,207	0,153	17,066	8,319	91,56636	15,59364
2,207	2,289	2,371	0,165	26,444	15,944	89,04583	18,11417
2,371	2,46	2,548	0,177	9,784	16,343	88,96687	18,19313

Plošná hmotnost nanovláknenné membrány 1g/m²

Vzorek 1			
Testovaná plocha filtru:	100 cm ²	Tlakový spád na začátku měření:	12 Pa
Rychlost proudění vzduchu:	5 cm/s	Tlakový spád na konci měření:	14 Pa
Druh aerosolu:	DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu:	30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 1 plošné hmotnosti 1g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup Xu [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1620,156	1267,411	79,25472	20,74528
0,124	0,129	0,133	0,009	3395,757	2431,644	79,94641	20,0536
0,133	0,138	0,143	0,01	3337,009	2830,075	80,89707	19,10293
0,143	0,149	0,154	0,011	4259,557	3508,772	81,49955	18,50045
0,154	0,16	0,165	0,011	3983,978	3295,274	83,16052	16,83948
0,165	0,172	0,178	0,012	3343,983	2864,134	85,08085	14,91915
0,178	0,184	0,191	0,013	3426,837	2916,732	85,28624	14,71376
0,191	0,198	0,205	0,014	3399,916	3054,98	85,38263	14,61737

0,205	0,213	0,221	0,015	3463,402	2945,643	85,50214	14,49786
0,221	0,229	0,237	0,016	3385,514	2919,886	85,54286	14,45714
0,237	0,246	0,255	0,018	2853,755	2370,012	85,182	14,81801
0,255	0,264	0,274	0,019	2109,336	1762,343	82,30359	17,69641
0,274	0,284	0,294	0,02	1385,448	1190,591	81,73031	18,26969
0,294	0,305	0,316	0,022	1282,898	1059,524	80,14985	19,85015
0,316	0,328	0,34	0,024	1356,909	945,843	78,60417	21,39583
0,34	0,352	0,365	0,025	1107,676	897,634	77,89	22,11
0,365	0,379	0,392	0,027	1201,617	903,414	76,78332	23,21668
0,392	0,407	0,422	0,029	1138,831	822,568	75,69556	24,30444
0,422	0,437	0,453	0,031	1129,233	887,018	75,9256	24,07441
0,453	0,47	0,487	0,034	1081,949	845,962	74,4215	25,5785
0,487	0,505	0,523	0,036	936,904	702,434	74,1443	25,8557
0,523	0,543	0,562	0,039	791,886	564,741	72,59654	27,40346
0,562	0,583	0,604	0,042	669	471,704	72,58881	27,41119
0,604	0,627	0,649	0,045	566,737	415,095	71,74804	28,25196
0,649	0,674	0,698	0,048	581,461	356,987	70,08463	29,91537
0,698	0,724	0,75	0,052	438,347	344,087	69,24761	30,75239
0,75	0,778	0,806	0,056	413,401	298,902	68,28299	31,71701
0,806	0,836	0,866	0,06	345,744	218,96	68,49461	31,50539
0,866	0,898	0,931	0,065	270,47	177,041	66,72543	33,27457
0,931	0,965	1	0,069	319,435	203,661	62,91165	37,08836
1	1,037	1,075	0,075	223,248	166,82	60,64676	39,35324
1,075	1,115	1,155	0,08	267,354	131,032	56,06318	43,93683
1,155	1,198	1,241	0,086	201,994	104,633	53,6373	46,3627
1,241	1,287	1,334	0,093	169,783	95,841	48,32109	51,67891
1,334	1,383	1,433	0,099	151,348	47,289	48,29177	51,70823
1,433	1,486	1,54	0,107	85,635	41,512	47,8542	52,1458
1,54	1,597	1,655	0,115	54,945	14,584	41,23128	58,76872
1,655	1,717	1,778	0,123	42,325	31,54	37,00013	62,99987
1,778	1,845	1,911	0,133	30,001	13,785	41,0959	58,9041
1,911	1,982	2,054	0,143	31,695	1,724	52,66864	47,33136
2,054	2,13	2,207	0,153	19,448	5,218	55,88739	44,11261
2,207	2,289	2,371	0,165	7,165	4,293	47,55188	52,44812
2,371	2,46	2,548	0,177	1,872	2,654	40,98793	59,01207

Vzorek 2			
Testovaná plocha filtru: 100 cm ²		Tlak před filtrem na začátku měření: 12 Pa	
Rychlost proudění vzduchu: 5 cm/s		Tlak za filtrem na konci měření: 14 Pa	
Druh aerosolu: DEHS		Celkový objemový průtok vzduchu: 30 l/min.	

Hodnoty měření získané pro vzorek 2 plošné hmotnosti 1g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1731,205	1256,057	81,9003	18,0997
0,124	0,129	0,133	0,009	3118,691	2483,724	83,08996	16,91004
0,133	0,138	0,143	0,01	3214,297	2869,582	82,90029	17,09971
0,143	0,149	0,154	0,011	4096,244	3528,167	83,19853	16,80147
0,154	0,16	0,165	0,011	3727,58	3274,628	84,71713	15,28287
0,165	0,172	0,178	0,012	3377,045	2767,554	85,45186	14,54814
0,178	0,184	0,191	0,013	3290,586	2796,601	84,21633	15,78368
0,191	0,198	0,205	0,014	3390,224	2820,127	85,16084	14,83916
0,205	0,213	0,221	0,015	3383,909	2868,982	84,53527	15,46474
0,221	0,229	0,237	0,016	3407,842	2747,636	83,40919	16,59081
0,237	0,246	0,255	0,018	2640,675	2449,051	82,49988	17,50012
0,255	0,264	0,274	0,019	2017,332	1683,858	81,60344	18,39656
0,274	0,284	0,294	0,02	1526,29	1130,514	80,40708	19,59292
0,294	0,305	0,316	0,022	1226,573	964,366	79,82986	20,17014
0,316	0,328	0,34	0,024	1190,767	915,807	76,76315	23,23685
0,34	0,352	0,365	0,025	1092,739	834,946	74,49811	25,50189
0,365	0,379	0,392	0,027	1164,528	891,869	73,84746	26,15254
0,392	0,407	0,422	0,029	1191,002	848,903	70,8485	29,1515
0,422	0,437	0,453	0,031	1203,777	813,926	69,72705	30,27295
0,453	0,47	0,487	0,034	1112,134	773,099	68,55659	31,44341
0,487	0,505	0,523	0,036	1045,448	602,492	66,8413	33,1587
0,523	0,543	0,562	0,039	830,753	573,709	64,68441	35,31559
0,562	0,583	0,604	0,042	596,803	407,111	64,03419	35,96581
0,604	0,627	0,649	0,045	563,469	363,885	61,85792	38,14208
0,649	0,674	0,698	0,048	529,051	297,211	61,24312	38,75688
0,698	0,724	0,75	0,052	459,783	289,952	62,91083	37,08917

0,75	0,778	0,806	0,056	452,625	245,69	61,9553	38,0447
0,806	0,836	0,866	0,06	411,159	219,257	60,8149	39,1851
0,866	0,898	0,931	0,065	291,895	235,655	60,00733	39,99267
0,931	0,965	1	0,069	305,471	187,946	59,78947	40,21053
1	1,037	1,075	0,075	309,092	174,935	60,25404	39,74596
1,075	1,115	1,155	0,08	242,588	122,568	58,61033	41,38967
1,155	1,198	1,241	0,086	187,017	115,086	51,80697	48,19304
1,241	1,287	1,334	0,093	125,322	72,102	47,77965	52,22036
1,334	1,383	1,433	0,099	151,002	63,15	44,52766	55,47234
1,433	1,486	1,54	0,107	112,999	37,413	41,91334	58,08666
1,54	1,597	1,655	0,115	72,286	24,097	36,11742	63,88258
1,655	1,717	1,778	0,123	39,737	13,444	33,31104	66,68896
1,778	1,845	1,911	0,133	37,185	11,983	36,71504	63,28496
1,911	1,982	2,054	0,143	32,838	6,885	31,98514	68,01486
2,054	2,13	2,207	0,153	18,246	6,913	27,22295	72,77706
2,207	2,289	2,371	0,165	10,519	6,905	27,01047	72,98953
2,371	2,46	2,548	0,177	12,71	0	24,72466	75,27534

Vzorek 3

Testovaná plocha filtru: 100 cm² **Tlakový spád na začátku měření:** 12 Pa

Rychlost proudění vzduchu: 5 cm/s **Tlakový spád na konci měření:** 14 Pa

Druh aerosolu: DEHS **Celkový objemový průtok vzduchu:** 30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 3 plošné hmotnosti 1g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1628,087	1082,535	71,92607	28,07393
0,124	0,129	0,133	0,009	3222,778	2176,473	73,11683	26,88317
0,133	0,138	0,143	0,01	3589,241	2576,264	75,30901	24,69099
0,143	0,149	0,154	0,011	4043,307	3311,53	76,68395	23,31605
0,154	0,16	0,165	0,011	3776,328	2941	79,34646	20,65354
0,165	0,172	0,178	0,012	3167,63	2732,712	81,83232	18,16768
0,178	0,184	0,191	0,013	3266,163	2774,069	82,79797	17,20203
0,191	0,198	0,205	0,014	3295,076	2805,059	82,17364	17,82636
0,205	0,213	0,221	0,015	3173,614	2695,512	81,59136	18,40864

0,221	0,229	0,237	0,016	3310,269	2599,784	79,18501	20,81499
0,237	0,246	0,255	0,018	2901,504	2249,571	76,74844	23,25156
0,255	0,264	0,274	0,019	2059,409	1519,926	74,16366	25,83634
0,274	0,284	0,294	0,02	1578,824	1096,106	73,45921	26,54079
0,294	0,305	0,316	0,022	1277,306	867,005	74,22986	25,77014
0,316	0,328	0,34	0,024	1314,239	881,004	73,32796	26,67204
0,34	0,352	0,365	0,025	1072,818	858,297	72,0286	27,9714
0,365	0,379	0,392	0,027	1055,295	885,725	71,18609	28,81391
0,392	0,407	0,422	0,029	1065,591	758,892	71,24239	28,75761
0,422	0,437	0,453	0,031	1177,678	762,056	70,5706	29,4294
0,453	0,47	0,487	0,034	1121,938	712,744	67,85595	32,14405
0,487	0,505	0,523	0,036	858,389	586,037	64,98049	35,01951
0,523	0,543	0,562	0,039	782,155	487,539	62,9846	37,0154
0,562	0,583	0,604	0,042	597,266	364,341	63,25406	36,74594
0,604	0,627	0,649	0,045	538,67	343,689	61,52138	38,47862
0,649	0,674	0,698	0,048	527,241	301,828	60,77841	39,22159
0,698	0,724	0,75	0,052	387,576	258,105	61,03301	38,96699
0,75	0,778	0,806	0,056	407,024	209,207	59,14588	40,85412
0,806	0,836	0,866	0,06	357,799	225,667	60,44657	39,55343
0,866	0,898	0,931	0,065	259,252	166,219	58,33784	41,66216
0,931	0,965	1	0,069	307,834	147,118	57,46205	42,53795
1	1,037	1,075	0,075	206,567	150,604	54,46251	45,53749
1,075	1,115	1,155	0,08	263,188	111,817	52,1496	47,85041
1,155	1,198	1,241	0,086	164,38	99,391	51,27094	48,72906
1,241	1,287	1,334	0,093	166,434	50,6	50,37819	49,62181
1,334	1,383	1,433	0,099	113,559	53,237	46,98487	53,01513
1,433	1,486	1,54	0,107	50,986	29,554	46,25802	53,74198
1,54	1,597	1,655	0,115	37,545	15,597	50,96373	49,03627
1,655	1,717	1,778	0,123	27,389	13,463	53,90644	46,09356
1,778	1,845	1,911	0,133	31,953	11,95	53,23254	46,76747
1,911	1,982	2,054	0,143	16,467	15,38	73,52333	26,47667
2,054	2,13	2,207	0,153	6,368	3,248	68,93348	31,06653
2,207	2,289	2,371	0,165	12,599	5,312	63,38793	36,61208
2,371	2,46	2,548	0,177	0	0	58,04541	41,95459

Plošná hmotnost nanovlákněné membrány 3g/m^2

Vzorek 1			
Testovaná plocha filtru:	100 cm ²	Tlakový spád na začátku měření:	144 Pa
Rychlost proudění vzduchu:	5 cm/s	Tlakový spád na konci měření:	198 Pa
Druh aerosolu:	DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu:	30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 1 plošné hmotnosti 3g/m^2 .

Velikost částic před filtrem X_u [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem X_o [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dN_{up} [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dN_{down} [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1970,785	663,8	37,14128	62,85872
0,124	0,129	0,133	0,009	3481,016	1238,883	39,51415	60,48585
0,133	0,138	0,143	0,01	3673,684	1548,537	39,90342	60,09659
0,143	0,149	0,154	0,011	4299,322	2004,893	41,63165	58,36835
0,154	0,16	0,165	0,011	4005,746	1660,801	42,86712	57,13288
0,165	0,172	0,178	0,012	3418,832	1446,959	42,18167	57,81833
0,178	0,184	0,191	0,013	3535,104	1476,508	40,8303	59,1697
0,191	0,198	0,205	0,014	3557,8	1377,754	39,65878	60,34122
0,205	0,213	0,221	0,015	3338,34	1331,194	38,83259	61,16741
0,221	0,229	0,237	0,016	3413,355	1215,253	37,33658	62,66342
0,237	0,246	0,255	0,018	2980,123	1138,176	36,14449	63,85551
0,255	0,264	0,274	0,019	2144,932	735,432	33,96396	66,03605
0,274	0,284	0,294	0,02	1479,974	484,906	33,31355	66,68645
0,294	0,305	0,316	0,022	1249,928	362,145	31,7844	68,2156
0,316	0,328	0,34	0,024	1121,885	362,94	30,69573	69,30427
0,34	0,352	0,365	0,025	1090,91	333,234	30,08028	69,91972
0,365	0,379	0,392	0,027	1136,335	327,76	30,09546	69,90454
0,392	0,407	0,422	0,029	1157,723	343,696	28,53887	71,46113
0,422	0,437	0,453	0,031	1100,599	319,714	27,54245	72,45755
0,453	0,47	0,487	0,034	1127,062	276,896	25,97509	74,02491
0,487	0,505	0,523	0,036	871,74	222,855	23,42485	76,57515
0,523	0,543	0,562	0,039	765,379	160,782	20,98544	79,01456
0,562	0,583	0,604	0,042	666,655	112,905	20,22662	79,77338
0,604	0,627	0,649	0,045	601,866	101,427	18,88075	81,11925
0,649	0,674	0,698	0,048	462,79	96,139	17,51499	82,48501
0,698	0,724	0,75	0,052	455,92	85,873	17,50019	82,49981
0,75	0,778	0,806	0,056	412,338	58,461	17,37731	82,62269

0,806	0,836	0,866	0,06	354,084	59,706	15,78557	84,21443
0,866	0,898	0,931	0,065	332,022	53,913	13,3322	86,6678
0,931	0,965	1	0,069	294,819	37,781	11,99199	88,00801
1	1,037	1,075	0,075	302,798	19,888	9,74365	90,25635
1,075	1,115	1,155	0,08	248,745	18,599	8,765875	91,23413
1,155	1,198	1,241	0,086	262,671	14,763	8,19544	91,80456
1,241	1,287	1,334	0,093	151,073	17,145	8,411509	91,58849
1,334	1,383	1,433	0,099	167,517	16,69	8,489792	91,51021
1,433	1,486	1,54	0,107	99,03	7,574	9,306107	90,69389
1,54	1,597	1,655	0,115	72,531	5,707	8,691393	91,30861
1,655	1,717	1,778	0,123	53,096	5,151	7,911064	92,08894
1,778	1,845	1,911	0,133	20,063	1,66	6,381361	93,61864
1,911	1,982	2,054	0,143	27,723	1,68	4,807685	95,19232
2,054	2,13	2,207	0,153	17,458	0	6,007715	93,99229
2,207	2,289	2,371	0,165	10,999	0	4,35267	95,64733
2,371	2,46	2,548	0,177	10,774	1,692	10,20131	89,79869

Vzorek 2

Testovaná plocha filtru: 100 cm² Tlakový spád na začátku měření: 130 Pa

Rychlost proudění vzduchu: 5 cm/s Tlakový spád na konci měření: 174 Pa

Druh aerosolu: DEH Celkový objemový průtok vzduchu: 30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 2 plošné hmotnosti 3g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1994,942	343,682	21,88244	78,11757
0,124	0,129	0,133	0,009	3381,499	708,139	22,52061	77,47939
0,133	0,138	0,143	0,01	3484,037	826,403	22,39231	77,60769
0,143	0,149	0,154	0,011	4067,72	1042,997	22,27434	77,72566
0,154	0,16	0,165	0,011	3937,791	987,334	22,84756	77,15245
0,165	0,172	0,178	0,012	3416,96	743,216	22,91409	77,08591
0,178	0,184	0,191	0,013	3314,612	714,846	22,24822	77,75178
0,191	0,198	0,205	0,014	3406,517	723,55	20,96748	79,03252
0,205	0,213	0,221	0,015	3191,04	683,116	19,28007	80,71993

0,221	0,229	0,237	0,016	3388,762	645,85	18,13045	81,86955
0,237	0,246	0,255	0,018	3001,829	500,575	16,77769	83,22231
0,255	0,264	0,274	0,019	2073,112	274,924	15,54513	84,45487
0,274	0,284	0,294	0,02	1481,675	203,042	13,72695	86,27305
0,294	0,305	0,316	0,022	1284,778	155,422	12,48378	87,51622
0,316	0,328	0,34	0,024	1211,374	152,781	11,80548	88,19453
0,34	0,352	0,365	0,025	1266,058	109,895	11,2964	88,7036
0,365	0,379	0,392	0,027	1106,371	114,58	10,57306	89,42694
0,392	0,407	0,422	0,029	1124,733	134,153	10,19175	89,80826
0,422	0,437	0,453	0,031	1093,283	106,025	9,406601	90,5934
0,453	0,47	0,487	0,034	1059,367	91,53	8,815258	91,18474
0,487	0,505	0,523	0,036	897,333	84,6	8,097438	91,90256
0,523	0,543	0,562	0,039	789,72	56,198	7,190726	92,80927
0,562	0,583	0,604	0,042	688,319	31,254	6,650585	93,34942
0,604	0,627	0,649	0,045	614,113	32,742	6,051054	93,94895
0,649	0,674	0,698	0,048	527,81	29,455	5,628005	94,372
0,698	0,724	0,75	0,052	468,627	27,728	5,06441	94,93559
0,75	0,778	0,806	0,056	503,201	22,359	5,218611	94,78139
0,806	0,836	0,866	0,06	410,938	26,574	5,198668	94,80133
0,866	0,898	0,931	0,065	361,379	11,46	5,136046	94,86395
0,931	0,965	1	0,069	305,078	17,146	5,345882	94,65412
1	1,037	1,075	0,075	244,697	12,705	6,047204	93,9528
1,075	1,115	1,155	0,08	220,3	11,328	5,123399	94,8766
1,155	1,198	1,241	0,086	192,827	14,242	4,670391	95,32961
1,241	1,287	1,334	0,093	143,115	13,385	4,395494	95,60451
1,334	1,383	1,433	0,099	150,876	0	3,653772	96,34623
1,433	1,486	1,54	0,107	96,138	0	3,705517	96,29448
1,54	1,597	1,655	0,115	90,218	3,334	3,744725	96,25528
1,655	1,717	1,778	0,123	50,268	0	2,408633	97,59137
1,778	1,845	1,911	0,133	30,543	1,681	2,408633	97,59137
1,911	1,982	2,054	0,143	21,51	1,648	2,408633	97,59137
2,054	2,13	2,207	0,153	4,844	0	1,880658	98,11934
2,207	2,289	2,371	0,165	9,568	0	1,880657	98,11934
2,371	2,46	2,548	0,177	7,195	0	1,094316	98,90568

Vzorek 3			
Testovaná plocha filtru:	100 cm ²	Tlakový spád na začátku měření:	83 Pa
Rychlost proudění vzduchu:	5 cm/s	Tlakový spád konci měření:	105 Pa
Druh aerosolu:	DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu:	30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 3 plošné hmotnosti 3g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1986,801	356,513	22,41299	77,58701
0,124	0,129	0,133	0,009	3362,123	708,026	23,05747	76,94253
0,133	0,138	0,143	0,01	3639,772	869,303	23,37222	76,62778
0,143	0,149	0,154	0,011	4244,668	1136,109	23,24012	76,75988
0,154	0,16	0,165	0,011	3884,569	995,824	23,92369	76,07631
0,165	0,172	0,178	0,012	3418,831	852,862	23,82101	76,17899
0,178	0,184	0,191	0,013	3474,605	779,963	23,19749	76,80251
0,191	0,198	0,205	0,014	3432,434	780,159	22,17404	77,82596
0,205	0,213	0,221	0,015	3306,143	672,474	21,08541	78,91459
0,221	0,229	0,237	0,016	3240,101	632,428	20,27699	79,72301
0,237	0,246	0,255	0,018	2886,109	565,717	18,74159	81,25841
0,255	0,264	0,274	0,019	2134,165	384,469	18,17504	81,82496
0,274	0,284	0,294	0,02	1473,149	284,128	17,63909	82,36091
0,294	0,305	0,316	0,022	1339,071	156,668	16,63054	83,36946
0,316	0,328	0,34	0,024	1116,225	209,439	15,92022	84,07978
0,34	0,352	0,365	0,025	1203,005	199,56	15,09851	84,90149
0,365	0,379	0,392	0,027	1137,055	141,665	14,02067	85,97933
0,392	0,407	0,422	0,029	1128,552	165,098	14,30189	85,69811
0,422	0,437	0,453	0,031	1212,514	148,69	13,3068	86,6932
0,453	0,47	0,487	0,034	1096,403	128,742	12,66774	87,33226
0,487	0,505	0,523	0,036	941,116	128,634	12,37448	87,62552
0,523	0,543	0,562	0,039	703,491	82,995	11,64501	88,35499
0,562	0,583	0,604	0,042	565,956	68,566	10,77137	89,22863
0,604	0,627	0,649	0,045	560,525	58,329	10,19524	89,80476
0,649	0,674	0,698	0,048	536,016	51,044	9,205582	90,79442
0,698	0,724	0,75	0,052	485,311	29,835	8,827274	91,17273
0,75	0,778	0,806	0,056	418,61	32,272	7,937242	92,06276
0,806	0,836	0,866	0,06	402,792	27,151	7,936932	92,06307
0,866	0,898	0,931	0,065	419,334	38,367	8,037157	91,96284

0,931	0,965	1	0,069	303,578	17,865	10,13479	89,86521
1	1,037	1,075	0,075	226,927	23,609	9,561466	90,43853
1,075	1,115	1,155	0,08	194,056	19,841	9,453091	90,54691
1,155	1,198	1,241	0,086	143,044	29,797	8,827246	91,17275
1,241	1,287	1,334	0,093	169,515	6,265	8,837367	91,16263
1,334	1,383	1,433	0,099	137,515	8,226	8,774069	91,22593
1,433	1,486	1,54	0,107	95,459	4,552	8,73412	91,26588
1,54	1,597	1,655	0,115	87,584	5,216	6,124568	93,87543
1,655	1,717	1,778	0,123	40,448	4,029	6,111513	93,88849
1,778	1,845	1,911	0,133	24,982	2,484	5,256936	94,74306
1,911	1,982	2,054	0,143	42,675	1,094	4,575718	95,42428
2,054	2,13	2,207	0,153	16,04	0,578	3,724909	96,27509
2,207	2,289	2,371	0,165	12,689	0	2,30193	97,69807

Plošná hmotnost nanovlákněné membrány 5g/m²

Vzorek 1			
Testovaná plocha filtru:		100 cm ²	Tlakový spád na začátku měření: 272 Pa
Rychlost proudění vzduchu:		5 cm/s	Tlakový spád na konci měření: 348 Pa
Druh aerosolu:		DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu: 30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 1 plošné hmotnosti 5g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1803,734	166,173	13,30992	86,69008
0,124	0,129	0,133	0,009	2981,34	453,78	13,69163	86,30837
0,133	0,138	0,143	0,01	3223,229	489,682	13,64575	86,35425
0,143	0,149	0,154	0,011	3866,82	526,43	13,40435	86,59565
0,154	0,16	0,165	0,011	3439,714	523,471	13,68203	86,31797
0,165	0,172	0,178	0,012	2884,376	386,978	12,76867	87,23134
0,178	0,184	0,191	0,013	2753,108	329,161	11,85051	88,14949
0,191	0,198	0,205	0,014	2968,944	331,228	10,99548	89,00452
0,205	0,213	0,221	0,015	2867,404	253,11	9,627407	90,37259
0,221	0,229	0,237	0,016	2852,752	250,049	8,310116	91,68988
0,237	0,246	0,255	0,018	2491,778	190,093	6,959968	93,04003
0,255	0,264	0,274	0,019	1669,726	94,205	5,894315	94,10569
0,274	0,284	0,294	0,02	1300,528	54,561	4,954267	95,04573

0,294	0,305	0,316	0,022	1187,836	29,755	4,091949	95,90805
0,316	0,328	0,34	0,024	929,295	34,355	3,403451	96,59655
0,34	0,352	0,365	0,025	1026,23	23,058	2,811031	97,18897
0,365	0,379	0,392	0,027	969,501	26,457	2,329808	97,67019
0,392	0,407	0,422	0,029	875,059	24,583	2,029874	97,97013
0,422	0,437	0,453	0,031	940,733	14,064	1,64549	98,35451
0,453	0,47	0,487	0,034	955,947	7,903	1,401278	98,59872
0,487	0,505	0,523	0,036	776,672	3,149	1,011424	98,98858
0,523	0,543	0,562	0,039	695,83	7,001	0,620016	99,37998
0,562	0,583	0,604	0,042	620,167	3,332	0,610544	99,38946
0,604	0,627	0,649	0,045	453,725	0	0,570935	99,42907
0,649	0,674	0,698	0,048	423,202	0,294	0,608575	99,39143
0,698	0,724	0,75	0,052	329,042	4,701	0,464837	99,53516
0,75	0,778	0,806	0,056	302,919	1,664	0,388073	99,61193
0,806	0,836	0,866	0,06	248,73	1,664	0,388073	99,61193
0,866	0,898	0,931	0,065	269,793	0	0,378149	99,62185
0,931	0,965	1	0,069	246,08	0	0,174052	99,82595
1	1,037	1,075	0,075	198,254	0	0,095556	99,90444
1,075	1,115	1,155	0,08	154,503	0	0,020797	99,9792
1,155	1,198	1,241	0,086	144,335	0	0,237121	99,76288
1,241	1,287	1,334	0,093	127,612	0	0,237121	99,76288
1,334	1,383	1,433	0,099	109,143	0,159	0,237121	99,76288
1,433	1,486	1,54	0,107	98,998	1,499	0,237121	99,76288
1,54	1,597	1,655	0,115	57,66	0	0,237121	99,76288
1,655	1,717	1,778	0,123	33,502	0	0,237121	99,76288
1,778	1,845	1,911	0,133	34,182	0	0,216323	99,78368
1,911	1,982	2,054	0,143	28,875	0	0	100
2,054	2,13	2,207	0,153	18,075	0	0	100
2,207	2,289	2,371	0,165	18,059	0	0	100

Vzorek 2

Testovaná plocha filtru: 100 cm² **Tlakový spád na začátku měření:** 288 Pa

Rychlost proudění vzduchu: 5 cm/s **Tlakový spád na konci měření:** 355 Pa

Druh aerosolu: DEHS **Celkový objemový průtok vzduchu:** 30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 2 plošné hmotnosti 5g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1710,883	127,656	9,642656	90,35734
0,124	0,129	0,133	0,009	2936,178	264,935	9,597098	90,4029
0,133	0,138	0,143	0,01	3089,243	357,912	9,393198	90,6068
0,143	0,149	0,154	0,011	3566,395	374,483	9,374566	90,62543
0,154	0,16	0,165	0,011	3194,41	300,749	9,295371	90,70463
0,165	0,172	0,178	0,012	2847,865	238,472	9,02232	90,97768
0,178	0,184	0,191	0,013	2911,17	269,655	8,300664	91,69934
0,191	0,198	0,205	0,014	2921,6	201,796	7,424652	92,57535
0,205	0,213	0,221	0,015	2693,061	191,524	6,639559	93,36044
0,221	0,229	0,237	0,016	2658,439	173,707	5,878692	94,12131
0,237	0,246	0,255	0,018	2342,892	102,343	4,982641	95,01736
0,255	0,264	0,274	0,019	1753,255	68,714	4,216311	95,78369
0,274	0,284	0,294	0,02	1137,53	34,668	3,620018	96,37998
0,294	0,305	0,316	0,022	1030,176	30,807	2,99788	97,00212
0,316	0,328	0,34	0,024	923,278	14,244	2,597688	97,40231
0,34	0,352	0,365	0,025	990,52	29,099	2,350902	97,6491
0,365	0,379	0,392	0,027	929,603	20,258	2,202421	97,79758
0,392	0,407	0,422	0,029	892,816	13,99	1,875876	98,12412
0,422	0,437	0,453	0,031	1018,815	22,329	1,876009	98,12399
0,453	0,47	0,487	0,034	873,983	17,552	1,777367	98,22263
0,487	0,505	0,523	0,036	770,825	5,431	1,552668	98,44733
0,523	0,543	0,562	0,039	618,608	9,549	1,546226	98,45377
0,562	0,583	0,604	0,042	536,003	12,045	1,455594	98,54441
0,604	0,627	0,649	0,045	403,99	2,449	1,301666	98,69833
0,649	0,674	0,698	0,048	384,521	5,852	1,297658	98,70234
0,698	0,724	0,75	0,052	336,389	5,239	1,158706	98,84129
0,75	0,778	0,806	0,056	328,579	3,058	0,999616	99,00038
0,806	0,836	0,866	0,06	245,146	1,659	1,054264	98,94574
0,866	0,898	0,931	0,065	290,355	1,658	0,836862	99,16314
0,931	0,965	1	0,069	222,663	2,524	0,614393	99,38561
1	1,037	1,075	0,075	247,448	2,447	0,481426	99,51857
1,075	1,115	1,155	0,08	175,319	0	0,384777	99,61522
1,155	1,198	1,241	0,086	117,02	0	0,303204	99,6968
1,241	1,287	1,334	0,093	102,133	0	0,141262	99,85874
1,334	1,383	1,433	0,099	102,539	0	0	100
1,433	1,486	1,54	0,107	95,382	0	0	100

1,54	1,597	1,655	0,115	47,255	0	0	100
1,655	1,717	1,778	0,123	36,175	0	0	100
1,778	1,845	1,911	0,133	15,837	0	0	100
1,911	1,982	2,054	0,143	12,956	0	0	100
2,054	2,13	2,207	0,153	17,07	0	0	100
2,207	2,289	2,371	0,165	1,964	0	0	100

Vzorek 3

Testovaná plocha filtru: 100 cm² **Tlakový spád na začátku měření:** 343 Pa

Rychlost proudění vzduchu: 5 cm/s **Tlakový spád na konci měření:** 434 Pa

Druh aerosolu: DEHS **Celkový objemový průtok vzduchu:** 30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 3 plošné hmotnosti 5g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1872,901	176,193	12,37819	87,62181
0,124	0,129	0,133	0,009	3036,933	352,058	12,38444	87,61556
0,133	0,138	0,143	0,01	3030,922	422,351	12,23777	87,76223
0,143	0,149	0,154	0,011	3724,129	542,904	12,04799	87,95201
0,154	0,16	0,165	0,011	3182,94	394,985	12,15541	87,84459
0,165	0,172	0,178	0,012	2874,28	330,669	11,6997	88,3003
0,178	0,184	0,191	0,013	2830,582	308,797	10,65034	89,34967
0,191	0,198	0,205	0,014	2812,325	285,716	9,312587	90,68741
0,205	0,213	0,221	0,015	2894,156	243,184	8,084163	91,91584
0,221	0,229	0,237	0,016	2888,292	190,314	6,984645	93,01536
0,237	0,246	0,255	0,018	2461,316	128,327	5,823012	94,17699
0,255	0,264	0,274	0,019	1824,345	69,516	4,925935	95,07407
0,274	0,284	0,294	0,02	1334,159	50,802	4,059116	95,94088
0,294	0,305	0,316	0,022	929,2	25,812	3,465936	96,53406
0,316	0,328	0,34	0,024	1028,866	39,919	3,057664	96,94234
0,34	0,352	0,365	0,025	980,255	22,887	2,805996	97,194
0,365	0,379	0,392	0,027	949,43	23,137	2,433048	97,56695
0,392	0,407	0,422	0,029	954,302	22,482	2,229229	97,77077
0,422	0,437	0,453	0,031	922,398	18,898	1,860023	98,13998
0,453	0,47	0,487	0,034	980,836	11,742	1,603064	98,39694
0,487	0,505	0,523	0,036	707,686	9,562	1,268493	98,73151

0,523	0,543	0,562	0,039	619,576	8,026	0,970428	99,02957
0,562	0,583	0,604	0,042	509,635	2,732	0,738605	99,2614
0,604	0,627	0,649	0,045	420,536	0,399	0,567581	99,43242
0,649	0,674	0,698	0,048	475,31	1,281	0,517596	99,4824
0,698	0,724	0,75	0,052	394,074	1,679	0,332531	99,66747
0,75	0,778	0,806	0,056	298,523	0	0,25594	99,74406
0,806	0,836	0,866	0,06	335,151	3,356	0,318186	99,68181
0,866	0,898	0,931	0,065	291,241	0	0,31441	99,68559
0,931	0,965	1	0,069	281,732	0	0,253552	99,74645
1	1,037	1,075	0,075	217,232	1,153	0,253552	99,74645
1,075	1,115	1,155	0,08	215,206	0,523	0,494363	99,50564
1,155	1,198	1,241	0,086	151,289	0	0,494363	99,50564
1,241	1,287	1,334	0,093	136,343	0	0,494363	99,50564
1,334	1,383	1,433	0,099	62,251	1,673	0,418561	99,58144
1,433	1,486	1,54	0,107	54,943	0	0,383849	99,61615
1,54	1,597	1,655	0,115	53,888	0	0,383849	99,61615
1,655	1,717	1,778	0,123	55,149	0	0,383849	99,61615
1,778	1,845	1,911	0,133	35,192	0	0	100
1,911	1,982	2,054	0,143	2,33	0	0	100
2,054	2,13	2,207	0,153	8,348	0	0	100
2,207	2,289	2,371	0,165	8,785	0	0	100
2,371	2,46	2,548	0,177	11,533	0	0	100
2,548	2,643	2,738	0,19	8,099	0		
2,738	2,841	2,943	0,204	11,61	0		
2,943	3,053	3,162	0,22	2,562	0		
3,162	3,28	3,398	0,236	0	0		
3,398	3,525	3,652	0,254	0	0		

Příloha 2:

Data vyhodnocená z přístroje MFP 1000 HEPA pro filtry s nanovláknennou membránou z Chitosan/PEO zvlákněnou na netkanou textilii typu meltblown

Plošná hmotnost nanovláknenné membrány 3 g/m²

Vzorek 1			
Testovaná plocha filtru:	100 cm ²	Tlakový spád na začátku měření:	147 Pa
Rychlost proudění vzduchu:	5 cm/s	Tlakový spád na konci měření:	171 Pa
Druh aerosolu:	DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu:	30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 1 plošné hmotnosti 3g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1330,484	209,035	18,96985	81,03015
0,124	0,129	0,133	0,009	2395,004	458,863	19,66427	80,33573
0,133	0,138	0,143	0,01	2585,554	508,875	20,27188	79,72812
0,143	0,149	0,154	0,011	3325,18	709,18	20,33709	79,66291
0,154	0,16	0,165	0,011	2868,52	643,753	21,2788	78,7212
0,165	0,172	0,178	0,012	2614,3	609,39	20,94927	79,05073
0,178	0,184	0,191	0,013	2674,27	554,333	20,88533	79,11468
0,191	0,198	0,205	0,014	2584,435	576,411	20,62239	79,37761
0,205	0,213	0,221	0,015	2788,473	469,925	19,38821	80,61179
0,221	0,229	0,237	0,016	2450,138	471,256	17,85733	82,14267
0,237	0,246	0,255	0,018	2229,085	434,382	16,47247	83,52753
0,255	0,264	0,274	0,019	1545,161	213,275	14,43668	85,56332
0,274	0,284	0,294	0,02	1256,345	158,22	13,20094	86,79907
0,294	0,305	0,316	0,022	999,191	110,254	11,6718	88,3282
0,316	0,328	0,34	0,024	924,153	74,419	10,32837	89,67163
0,34	0,352	0,365	0,025	999,02	81,942	9,406772	90,59323
0,365	0,379	0,392	0,027	865,395	73,818	8,605741	91,39426
0,392	0,407	0,422	0,029	898,176	90,563	7,822156	92,17784
0,422	0,437	0,453	0,031	888,449	65,315	7,378378	92,62162
0,453	0,47	0,487	0,034	896,738	62,65	7,1696	92,8304
0,487	0,505	0,523	0,036	712,267	39,526	6,371543	93,62846

0,523	0,543	0,562	0,039	642,907	31,799	5,382611	94,61739
0,562	0,583	0,604	0,042	457,49	30,838	4,760082	95,23992
0,604	0,627	0,649	0,045	384,23	11,31	4,187892	95,81211
0,649	0,674	0,698	0,048	404,323	12,779	3,484104	96,5159
0,698	0,724	0,75	0,052	465,153	13,926	2,941104	97,0589
0,75	0,778	0,806	0,056	352,231	10,501	2,09286	97,90714
0,806	0,836	0,866	0,06	264,474	1,647	1,745606	98,25439
0,866	0,898	0,931	0,065	287,545	3,293	1,334677	98,66532
0,931	0,965	1	0,069	204,947	1,646	0,906985	99,09302
1	1,037	1,075	0,075	220,67	1,131	0,564138	99,43586
1,075	1,115	1,155	0,08	180,741	0,513	0,605775	99,39423
1,155	1,198	1,241	0,086	161,985	0	0,442178	99,55782
1,241	1,287	1,334	0,093	130,697	0,76	0,327455	99,67255
1,334	1,383	1,433	0,099	96,539	0,883	0,254206	99,74579
1,433	1,486	1,54	0,107	66,558	0	0,213636	99,78636
1,54	1,597	1,655	0,115	36,879	0	0,213636	99,78636
1,655	1,717	1,778	0,123	47,63	0	0,130602	99,8694
1,778	1,845	1,911	0,133	55,281	0	0	100
1,911	1,982	2,054	0,143	12,635	0	0	100
2,054	2,13	2,207	0,153	14,371	0	0	100
2,207	2,289	2,371	0,165	14,602	0	0	100
2,371	2,46	2,548	0,177	17,33	0	0	100

Vzorek 2

Testovaná plocha filtru:	100 cm²	Tlakový spád na začátku měření:	178 Pa
Rychlost proudění vzduchu:	5 cm/s	Tlakový spád na konci měření:	214 Pa
Druh aerosolu:	DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu:	30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 2 plošné hmotnosti 3g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před filtrem a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1326,787	129,472	14,83529	85,16471
0,124	0,129	0,133	0,009	2499,624	348,245	15,49874	84,50126
0,133	0,138	0,143	0,01	2664,355	484,101	15,94444	84,05556
0,143	0,149	0,154	0,011	3442,658	601,826	15,86974	84,13026
0,154	0,16	0,165	0,011	3102,375	563,16	16,51896	83,48105

0,165	0,172	0,178	0,012	2736,874	497,37	16,23788	83,76212
0,178	0,184	0,191	0,013	2688,084	414,545	15,83527	84,16473
0,191	0,198	0,205	0,014	2918,943	417,49	14,83985	85,16015
0,205	0,213	0,221	0,015	2904,864	347,548	13,84329	86,15671
0,221	0,229	0,237	0,016	2736,453	420,081	12,59447	87,40553
0,237	0,246	0,255	0,018	2400,794	252,408	11,41349	88,58651
0,255	0,264	0,274	0,019	1650,385	184,458	10,47591	89,52409
0,274	0,284	0,294	0,02	1239,041	116,856	9,683952	90,31605
0,294	0,305	0,316	0,022	1044,113	74,703	8,747567	91,25243
0,316	0,328	0,34	0,024	999,585	77,365	8,19364	91,80636
0,34	0,352	0,365	0,025	975,816	62,654	7,656887	92,34311
0,365	0,379	0,392	0,027	897,819	78,978	7,074161	92,92584
0,392	0,407	0,422	0,029	886,519	58,829	6,716393	93,28361
0,422	0,437	0,453	0,031	922,489	68,443	5,92876	94,07124
0,453	0,47	0,487	0,034	936,748	50,135	5,21562	94,78438
0,487	0,505	0,523	0,036	794,769	36,96	4,367674	95,63233
0,523	0,543	0,562	0,039	664,564	14,795	3,520704	96,4793
0,562	0,583	0,604	0,042	504,154	7,203	2,544095	97,45591
0,604	0,627	0,649	0,045	498,353	14,258	2,147856	97,85214
0,649	0,674	0,698	0,048	409,649	2,897	1,885922	98,11408
0,698	0,724	0,75	0,052	325,99	1,901	1,637464	98,36254
0,75	0,778	0,806	0,056	317,593	8,189	1,528782	98,47122
0,806	0,836	0,866	0,06	239,017	6,733	1,225791	98,77421
0,866	0,898	0,931	0,065	255,828	1,246	1,12476	98,87524
0,931	0,965	1	0,069	245,727	1,641	1,141743	98,85826
1	1,037	1,075	0,075	221,646	1,64	0,829893	99,17011
1,075	1,115	1,155	0,08	172,612	0	0,427491	99,57251
1,155	1,198	1,241	0,086	155,096	1,089	0,357906	99,64209
1,241	1,287	1,334	0,093	139,025	0,55	0,262495	99,73751
1,334	1,383	1,433	0,099	102,385	0	0,156773	99,84323
1,433	1,486	1,54	0,107	59,466	0	0,156773	99,84323
1,54	1,597	1,655	0,115	59,374	0	0,05649	99,94351
1,655	1,717	1,778	0,123	36,595	0	0	100
1,778	1,845	1,911	0,133	20,901	0	0	100

Vzorek 3			
Testovaná plocha filtru:	100 cm ²	Tlakový spád na začátku měření:	189 Pa
Rychlost proudění vzduchu:	5 cm/s	Tlakový spád na konci měření:	229 Pa
Druh aerosolu:	DEHS	Celkový objemový průtok vzduchu:	30 l/min.

Hodnoty měření získané pro vzorek 3 plošné hmotnosti 3g/m².

Velikost částic před filtrem Xu [μm]	Průměrná velikost částic X [μm]	Velikost částic za filtrem Xo [μm]	Rozdíl velikostí částic před a za filtrem dX [μm]	Koncentrace částic před filtrem dNup [P/s]	Koncentrace částic za filtrem dNdown [P/s]	Průnik částic P [%]	Filtrační efektivita E [%]
0,115	0,12	0,124	0,009	1333,818	68,774	7,506963	92,49304
0,124	0,129	0,133	0,009	2438,691	197,058	7,580317	92,41968
0,133	0,138	0,143	0,01	2591,499	242,885	7,604569	92,39543
0,143	0,149	0,154	0,011	3075,744	228,184	7,446149	92,55385
0,154	0,16	0,165	0,011	3091,286	243,4	7,677272	92,32273
0,165	0,172	0,178	0,012	2591,735	200,233	7,374425	92,62558
0,178	0,184	0,191	0,013	2588,596	168,145	6,792586	93,20741
0,191	0,198	0,205	0,014	2617,749	177,327	6,274415	93,72559
0,205	0,213	0,221	0,015	2586,546	154,172	5,713322	94,28668
0,221	0,229	0,237	0,016	2535,896	134,39	4,917027	95,08297
0,237	0,246	0,255	0,018	2422,812	91,864	4,264863	95,73514
0,255	0,264	0,274	0,019	1495,646	59,019	3,513592	96,48641
0,274	0,284	0,294	0,02	1103,127	23,737	2,995567	97,00443
0,294	0,305	0,316	0,022	1060,699	20,477	2,516304	97,4837
0,316	0,328	0,34	0,024	955,526	14,477	2,265009	97,73499
0,34	0,352	0,365	0,025	924,99	21,593	1,89402	98,10598
0,365	0,379	0,392	0,027	859,187	16,708	1,71499	98,28501
0,392	0,407	0,422	0,029	861,787	17,516	1,535783	98,46422
0,422	0,437	0,453	0,031	851,117	11,483	1,402032	98,59797
0,453	0,47	0,487	0,034	879,914	7,907	1,108001	98,892
0,487	0,505	0,523	0,036	771,003	5,212	0,830191	99,16981
0,523	0,543	0,562	0,039	619,328	3,585	0,61069	99,38931
0,562	0,583	0,604	0,042	482,515	1,333	0,417955	99,58205
0,604	0,627	0,649	0,045	461,117	0	0,28959	99,71041
0,649	0,674	0,698	0,048	330,194	1,638	0,193013	99,80699
0,698	0,724	0,75	0,052	349,534	0	0,110318	99,88968
0,75	0,778	0,806	0,056	343,124	0	0,070866	99,92913
0,806	0,836	0,866	0,06	256,503	0	0,070866	99,92913
0,866	0,898	0,931	0,065	272,185	0	0,000001	100

0,931	0,965	1	0,069	200,981	0	0	100
1	1,037	1,075	0,075	226,222	0	0	100
1,075	1,115	1,155	0,08	142,97	0	0	100
1,155	1,198	1,241	0,086	126,791	0	0	100
1,241	1,287	1,334	0,093	104,815	0	0	100
1,334	1,383	1,433	0,099	82,485	0	0	100
1,433	1,486	1,54	0,107	67,86	0	0	100
1,54	1,597	1,655	0,115	61,016	0	0	100
1,655	1,717	1,778	0,123	37,858	0	0	100
1,778	1,845	1,911	0,133	15,615	0	0	100
1,911	1,982	2,054	0,143	21,785	0	0	100

Příloha 3:**Hodnoty komerčních filtrů**

Data byla získána z předchozích studií testování filtračních vlastností syntetických a skleněných filtrů na Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, Ing. Jakubem Hrůzou, PhD.

Filtr s nanovláknennou membránou z PU v kombinaci se spun-bondem, plošná hmotnost 2,3 g/m ²			
Testovaná plocha filtru: 100 cm ²		Tlakový spád na začátku měření: 115 Pa	
Druh aerosolu: DEHS		Tlakový spád na konci měření: 130 Pa	

Hodnoty pro filtr s nanovláknennou membránou z PU v plošné hmotnosti 2,3 g/m².

Průměrná velikost částic X [μm]	Filtrační efektivita E [%]	Průměrná velikost částic X [μm]	Filtrační efektivita E [%]	Průměrná velikost částic X [μm]	Filtrační efektivita E [%]
0,12	86,71368	0,505	94,8814	2,13	98,15239
0,129	86,52243	0,543	95,04356	2,289	98,15239
0,138	86,57741	0,583	95,63475	2,46	98,15239
0,149	85,75549	0,627	95,74341	2,643	98,91764
0,16	85,75949	0,674	96,07595	2,841	86,71368
0,172	86,74336	0,724	96,17194	3,053	
0,184	87,30657	0,778	96,20702	3,28	
0,198	87,93771	0,836	96,15224	3,525	
0,213	88,58448	0,898	96,16119		
0,229	89,69331	0,965	96,72142		
0,246	90,32486	1,037	96,72674		
0,264	90,73317	1,115	96,35526		
0,284	91,54549	1,198	96,40148		
0,305	92,08309	1,287	96,5998		
0,328	92,08291	1,383	96,49532		
0,352	92,34383	1,486	97,25913		
0,379	92,9564	1,597	98,65954		
0,407	93,10003	1,717	99,13035		
0,437	93,82703	1,845	98,98157		
0,47	94,47788	1,982	98,15239		

Filtr ze skleněných vláken			
Testovaná plocha filtru:		100 cm²	Tlakový spád na začátku měření:
			83,4 Pa
Druh aerosolu:		DEHS	Tlakový spád na konci měření:
			85,8 Pa

Hodnoty pro filtr ze skleněných vláken.

Průměrná velikost částic X [μm]	Filtrační efektivita E [%]
0,12	76,88064
0,129	76,04278
0,138	75,30485
0,149	73,8656
0,16	73,10523
0,172	73,26793
0,184	73,47666
0,198	74,68447
0,213	75,70009
0,229	77,21637
0,246	79,20918
0,264	81,28833
0,284	82,38645
0,305	83,6236
0,328	85,03364
0,352	85,40906
0,379	86,10687
0,407	87,4792
0,437	89,03891
0,47	89,42049
0,505	90,48555

Filtr ze skleněných vláken			
Testovaná plocha filtru: 100 cm ²		Tlakový spád na začátku měření:	60,2 Pa
Druh aerosolu: DEHS		Tlakový spád na konci měření:	62,8 Pa

Hodnoty pro filtr ze skleněných vláken.

Průměrná velikost částic X [μm]	Filtrační efektivita E [%]
0,12	44,17558
0,129	42,26921
0,138	41,71752
0,149	38,25763
0,16	36,33635
0,172	37,32879
0,184	38,7835
0,198	39,30812
0,213	41,17474
0,229	43,83819
0,246	45,92838
0,264	47,42125
0,284	49,54475
0,305	51,22996
0,328	52,64487
0,352	54,01894
0,379	55,83501
0,407	56,47816
0,437	58,50559
0,47	59,64663
0,505	60,03672

Příloha 4:**Hodnoty teploty a vlhkosti v akváriu***Teplota a vlhkost v akváriu během biodegradabilního testu*

Vlhkost a teplota v akváriu naměřená během celého průběhu biodegradabilního testu					
Den	Teplota v akváriu [°C]	Vlhkost v akváriu [%]	Den	Teplota v akváriu [°C]	Vlhkost v akváriu [%]
1	21,1	98	8	23,1	98,3
2	21,5	99,1	9	23,3	100
3	21,9	99	10	22,9	100
4	22,5	100	11	24,6	95,9
5	22,6	100	12	24,1	97,2
6	22,8	95	13	24,2	99,3
7	23	100	14	25,7	95,9